



Tito Rafael da Silva Gonçalves

Mestre em Energias Renováveis – Conversão Eléctrica e Utilização
Sustentáveis

Colheita Piezoeléctrica de Energia

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Mestrado em Energias Renováveis – Conversão Eléctrica e Utilização
Sustentáveis

Orientador: Professor Doutor Stanimir Stoyanov Valtchev, Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-Orientador: Professor Doutor Jorge Pamies Teixeira, Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor Adolfo Steiger Garção

Arguente: Professor Doutor Luís Brito Palma

Vogal: Professor Doutor Stanimir Stoyanov Valtchev

Vogal: Professor Doutor Jorge Pamies Teixeira



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Fevereiro 2011



Tito Rafael da Silva Gonçalves

Mestre em Energias Renováveis – Conversão Eléctrica e Utilização
Sustentáveis

Colheita Piezoelétrica de Energia

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Mestrado em Energias Renováveis – Conversão Eléctrica e Utilização
Sustentáveis

Orientador: Professor Doutor Stanimir Stoyanov Valtchev, Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-Orientador: Professor Doutor Jorge Pamies Teixeira, Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor Adolfo Steiger Garção
Arguente: Professor Doutor Luís Brito Palma
Vogal: Professor Doutor Stanimir Stoyanov Valtchev
Vogal: Professor Doutor Jorge Pamies Teixeira



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Fevereiro 2011

Título da Dissertação de Mestrado: Colheita Piezoelétrica de Energia, “Copyright” Tito Rafael da Silva Gonçalves, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

“A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor”.

Também, de acordo com os Regulamentos dos Cursos de 2.º, e 3.º ciclos e Mestrados Integrados, e o Despacho 41/2010 de 21 de Dezembro de 2010, as teses sujeitas a período de embargo só são divulgadas quando este período terminar. Um período de embargo da divulgação também pode ser solicitado para as dissertações elaboradas com base em artigos previamente publicados por outros editores, sempre que tal seja necessário para respeitar os direitos de cópia desses editores.

Dedico esta dissertação à minha família,
ao meu pai Luís, à minha mãe Dulce, aos meus irmãos João e Gil,
e a todos os meus amigos, decisivos no meu percurso académico.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos aqueles que dedicaram o seu tempo tornando possível a realização desta dissertação.

Em particular, um agradecimento especial aos meus pais, em especial nestes últimos anos, por todo o apoio decisivo na conclusão desta dissertação.

Ao professor Stanimir Valtchev, pela orientação, pelos conhecimentos transmitidos e esclarecimentos prestados.

Ao professor Pamies Teixeira um agradecimento especial, pela colaboração e orientação, por tornar possível a parceria entre os dois departamentos envolvidos, sendo fundamental para a concretização da presente dissertação.

Aos técnicos do laboratório de soldadura do DEMI, Sr. António Campos e Sr. Paulo Magalhães, pelo apoio incansável prestado, decisivo na realização deste estudo.

Ao colega da Universidade da Beira Interior, Filipe Casimiro pelo feedback e interesse que o seu trabalho despertou, nesta área da engenharia.

A todos os meus colegas em geral, em especial àqueles com os quais pude aprender e colaborar ao longo do meu percurso académico.

A todos os meus amigos que continuam a apoiar-me ao longo da vida.

Sumário

A procura e exploração de fontes alternativas de energia constituem um dos maiores desafios, no sentido de assegurar a sustentabilidade das gerações futuras. As crescentes necessidades energéticas da população mundial e a excessiva dependência de fontes tradicionais conduziram ao desenvolvimento de diferentes métodos de conversão e armazenamento de energia.

Com o aparecimento dos dispositivos móveis na década de 90 (como os computadores portáteis) surgiu a necessidade de se desenvolverem fontes móveis de energia. Nesse sentido surgiram inicialmente as baterias que permitiram o armazenamento e a mobilidade da energia.

O conceito da colheita de energia surgiu como uma alternativa para fornecimento de energia em aparelhos electrónicos móveis. Fundamentalmente, consiste em capturar a energia mecânica que máquinas ou organismos libertam para o meio e converte-la em energia eléctrica. Essa energia pode ser armazenada ou consumida no local da colheita, constituindo uma fonte renovável e limpa de energia.

A presente dissertação tem como objectivo o estudo do potencial energético do movimento de vibração de materiais com base no efeito piezoeléctrico.

Palavras-chave: Energias renováveis, Produção Sustentável de Energia, Mobilidade Energética, Colheita de Energia, Piezoelectricidade e Armazenamento de Energia.

Abstract

The search and exploration of alternative energy sources is one of the biggest challenges in ensuring the sustainability of future generations. The growing energy needs of the global population and excessive reliance on traditional sources led to the development of different methods of conversion and energy storage.

With the advent of mobile devices in the 90s (such as portable computers) came the need to develop mobile sources of energy. In this sense arose initially batteries, allowing storage and portability of energy.

The concept of energy harvesting has emerged as an alternative power supply in mobile electronic devices. Essentially, it consists in capturing the mechanical energy that machines or organisms release to the environment and to convert it into electricity. This energy can be stored or consumed locally, providing a source of renewable and clean energy.

This dissertation aims to study the potential energy of vibration movement of materials, based on the piezoelectric effect.

Keywords: Renewable energy, Sustainable Energy, Mobility, Energy, Energy Harvesting, Piezoelectricity and Energy Storage.

Lista de Símbolos

Toda a simbologia presente neste documento encontra-se definida localmente. Contudo, apresenta-se seguidamente a lista com os principais símbolos utilizados.

C	Capacidade da célula piezoelétrica, F
D_x	Fluxo dielétrico, C/m ²
d_{xy}	Coefficiente de acoplamento piezoelétrico, C/N
E	Energia, J ou Campo eléctrico, N/C ou Módulo da elasticidade, Pa
e_{xy}	Constante dielétrica da célula piezoelétrica, C/m ²
F	Força aplicada, N
f	Força externa, N ou Frequência natural de oscilação, Hz
g_{xy}	Coefficiente de tensão piezoelétrica do modo de excitação, V.m/N
h	Espessura da viga, m
I	Momento de Inércia, ou Corrente eléctrica, A
K	Rigidez da estrutura, N/m
k	Rigidez da célula, N/m ou Coeficiente de acoplamento electromecânico, %
L	Indutância da bobine, H ou comprimento, m
M	Massa, g
m	Massa de prova, g
n	Número de células piezoelétricas, adimensional
P	Potência eléctrica, W
Q	Carga eléctrica, C ou Factor de qualidade mecânica, adimensional
R	Resistência óhmica, Ω
S	Largura, m
S_x	Extensão da célula por unidade de comprimento, adimensional
s_{xy}	Deformabilidade, m ² /N
T	Período, s
T_x	Tensão mecânica (pressão ou stress), N/m ²
t	Rigidez da estrutura, m ou Tempo, s ou Espessura, m
u	Deslocamento, m
V	Tensão eléctrica, V

α	Constante proporcional de amortecimento ou Factor de força, adimensional
β	Constante da aproximação de Rayleigh-Ritz, adimensional
ε	Extensão, adimensional
ε_{xy}	Permissividade da célula piezoelétrica, F/m
γ	Coeficiente de inversão, adimensional
η	Rendimento, %
η_m	Factor de amortecimento mecânico, adimensional
θ	Coeficiente do acoplamento electromecânico, N/V ou desfasamento, rad
σ	Tensão mecânica (pressão ou stress), N/m ²
ω	Frequência angular de excitação (ou de trabalho), rad/s
ζ_m	Razão ou proporção de resistência do ar, adimensional
Θ	Coeficiente piezoelétrico efectivo, adimensional
Ω	Frequência normalizada, adimensional

Índice – Inferior

c	Valor medido em corrente contínua
DC	Grandeza eléctrica em corrente contínua
E	Propriedade medida com campo eléctrico nulo (curto-circuito)
e	Propriedade do eléctrodo, do circuito eléctrico ou elástica
f	Final
i	Modo de excitação (número natural) ou Inicial
$in-phase$	Valor em ressonância eléctrica
max	Valor Máximo
p	Propriedade da célula piezoelétrica ou Ligação paralelo
oc	Circuito aberto
opt	Valor óptimo
sc	Curto-circuito
x	Direcção do modo de excitação: 1 (longitudinal), 2 (espessura) ou 3 (transversal)
y	Direcção do modo de excitação: 1 (longitudinal), 2 (espessura) ou 3 (transversal)

Índice – Superior

E	Propriedade medida com campo eléctrico nulo (em curto-circuito)
S	Propriedade medida com extensão nula
$SSHIC$	Colheita Síncrona Comutada na Bobine
T	Propriedade medida com tensão mecânica nula

Índice de Matérias

Agradecimentos.....	vi
Sumário	viii
Abstract	ix
Lista de Símbolos	x
Índice de Matérias	xii
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas.....	xv
1. Introdução.....	1
2. Estado da Arte	2
3. Circuito Eléctrico.....	14
4. Técnicas Não-Lineares	23
5. Resultados Experimentais.....	34
6. Discussão	57
7. Bibliografia.....	58
8. Glossário.....	59
Anexos.....	60

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Efeito piezoelétrico directo	2
Figura 2.2 – Efeito piezoelétrico inverso	2
Figura 2.3 – Circuito eléctrico equivalente de unidade piezoelétrica	3
Figura 2.4 – Modos de ligação de geradores por flexão.	3
Figura 2.5 – Barras de Fibras Piezocerâmicas	5
Figura 2.6 – Esquema da estrutura do MFC	5
Figura 2.7 – Estrutura dos colectores piezoelétricos MFC	6
Figura 2.8 – Modos operativos do sensor piezoelétrico	6
Figura 2.9 – Esquema atómico do Efeito Piezoelétrico	6
Figura 2.10 – Tipos de deformações	7
Figura 2.11 – Modelos de colectores com tecnologia MFC	7
Figura 2.12 – Modelo em escala da cauda de avião com células MFC	8
Figura 2.13 – Turbina eólica piezoelétrica da American Windmills	8
Figura 2.14 – Avião não tripulado Hermes 450	9
Figura 2.15 – Amplificador de pilha na alça da mochila	9
Figura 2.16 – Gerador em forma de salto de sapato	10
Figura 2.17 – Protótipo de uma palmilha piezoelétrica	10
Figura 2.18 – Mecanismo de geração	11
Figura 2.19 – Protótipo do projecto PIZO	12
Figura 2.20 – Bar Surya em Londres	13
Figura 3.1 – Modelo equivalente do sistema colheita piezoelétrica das vibrações	14
Figura 3.2 – Gerador piezoelétrico: viga com flexor de tripla camada	14
Figura 3.3 – Esquema do circuito eléctrico para colheita de energia	15
Figura 3.4 – Formas de onda típica do deslocamento e tensão piezoelétrica	18
Figura 4.1 – Estrutura vibrante com células piezoelétricas na superfície	23
Figura 4.2 – Modelo encastrado para uma estrutura de instrumentos	24
Figura 4.3 – Técnica DC standard	25
Figura 4.4 – Técnica SSHI DC	25
Figura 4.5 – Ciclos Normalizados de Energia	28
Figura 4.6 – Técnica SECE	30
Figura 4.7 – Circuito da técnica SECE	32
Figura 4.8 – Sinóptico característico da técnica SECE	33
Figura 5.1 – Esquema do dispositivo de colheita	34
Figura 5.2 – Dispositivo de colheita de energia	34

Figura 5.3 – Célula MFC modelo M-8528-P2	35
Figura 5.4 – Dispositivo de colheita: Viga 1	36
Figura 5.5 – Viga 1 com célula piezoelétrica M-8528-P2	36
Figura 5.6 – Dispositivo de colheita: Viga 2	36
Figura 5.7 – Viga 2 com célula piezoelétrica M-2814-P2	36
Figura 5.8 – Gráfico da tensão AC em função da frequência de excitação da viga	37
Figura 5.9 – Gráfico da corrente e tensão retificada que percorre a resistência de carga	38
Figura 5.10 – Circuito e Sinóptico de Rectificador em Ponte com Díodos	39
Figura 5.11 – Circuito e Sinóptico de Rectificador com Filtragem	39
Figura 5.12 – Montagem rectificadora com filtragem	40
Figura 5.13 – Tensão, corrente e amplitude de oscilação na Viga 1	40
Figura 5.14 – Potência DC calculada para a Viga 1	42
Figura 5.15 – Tensão DC e Corrente DC medidos na Viga 2	43
Figura 5.16 – Potência DC calculada para a Viga 2	43
Figura 5.17 – Tensão DC, Corrente DC e amplitude da oscilação medidos na Viga 2	44
Figura 5.18 – Potência DC calculada para a Viga 2	44
Figura 5.19 – Configuração com duas células da viga oscilante	47
Figura 5.20 – Tensão e potência do paralelo de duas células piezoelétricas	47
Figura 5.21 – Tensão e potência da série de duas células piezoelétricas	48
Figura 5.22 – Tensão e potência do paralelo de duas células piezoelétricas	49
Figura 5.23 – Circuito de Compensação com Bobine	50
Figura 5.24 – Montagens de Compensação com Bobine em Série	50
Figura 5.25 – Tensão e Potência da compensação com bobine	51
Figura 5.26 – Circuito do Conversor DC-DC Boost	53
Figura 5.27 – Montagem experimental de Conversor Boost	54

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Tecnologias para colheita piezoelétrica de energia	4
Tabela 5.1 – Informações do fabricante dos modelos disponíveis	35
Tabela 5.2 – Informações do fabricante para os modelos usados	35
Tabela 5.3 – Dados obtidos e valores calculados	37
Tabela 5.4 – Dados medidos em laboratório (Carga regulada para 20 V)	41
Tabela 5.5 – Dados medidos em laboratório (Carga regulada para 20 V)	42
Tabela 5.6 – Dados medidos em laboratório (Carga regulada em tensão e em resistência)	45
Tabela 5.7 – Dados medidos em laboratório (SÉRIE de duas células)	48
Tabela 5.8 – Dados medidos em laboratório (PARALELO de duas células)	49
Tabela 5.9 – Bobine em Série com resistência de carga variável ($L = 24 \text{ mH}$)	52
Tabela 5.10 – Sinais de controlo da Gate do transistor MOSFET do Conversor 1	55
Tabela 5.11 – Sinais de controlo da Gate do transistor MOSFET do Conversor 2	56

1. Introdução

A dependência de fontes fósseis de energia em todo o mundo conduziu a um investimento em novos vectores de energia.

É neste contexto que surge o conceito de colheita de energia e que consiste na colheita ou captação de fontes de energia disponíveis no ambiente: energia cinética (vento, ondas, gravitacional, vibrações), energia térmica (solar-térmica, geotérmica, gradientes de temperatura, combustão), energia química (biocombustíveis, biomassa), energia atómica (nuclear, decaimento radioactivo) ou energia electromagnética (fotovoltaica, radiofrequência).

A colheita de energia pode ser feita em grande escala em parques eólicos ou fotovoltaicos, mas com a evolução de novas tecnologias a tendência é para a miniaturização e mobilidade [7].

A colheita piezoeléctrica de energia consiste no aproveitamento da energia entregue por um corpo em movimento para o meio que o envolve, constituindo por isso uma fonte de energia renovável. O sistema de colheita de energia utiliza as propriedades dos materiais piezoeléctricos, tendo como base o efeito piezoeléctrico directo, gerando uma carga eléctrica sempre que o material está sujeito a uma força mecânica de flexão [1].

Esta nova abordagem consiste na colheita da energia disponível no “ambiente” decorrente da utilização de dispositivos e a sua posterior transformação em energia eléctrica, permitindo construir equipamentos sem acumulação, de reduzido impacto ambiental, que funcionam autonomamente. Embora a escala da energia não seja significativa, pode ser suficiente para dispositivos com tecnologias de baixo consumo.

Um sistema de colheita de energia inclui o mecanismo de captação e conversão da energia, armazenamento e circuitos electrónicos para tratamento da energia [2]. O objectivo destes sistemas é fazer corresponder os circuitos de potência aos circuitos alvo da aplicação no sentido de obter o melhor desempenho global possível [8].

2. Estado da Arte

2.1 Piezoelectricidade

Os materiais piezoelétricos têm propriedades que lhes permitem gerar energia eléctrica ou mecânica, por alteração do seu estado mecânico ou eléctrico. Consideram-se dois efeitos principais, o efeito piezoelétrico directo (Fig.2.1) e o efeito piezoelétrico inverso (Fig.2.2). O efeito piezoelétrico directo, corresponde à geração de energia eléctrica como consequência da aplicação de uma força mecânica (estado de tensão), enquanto o efeito piezoelétrico inverso corresponde a uma alteração mecânica sempre que o material é submetido a uma carga eléctrica.

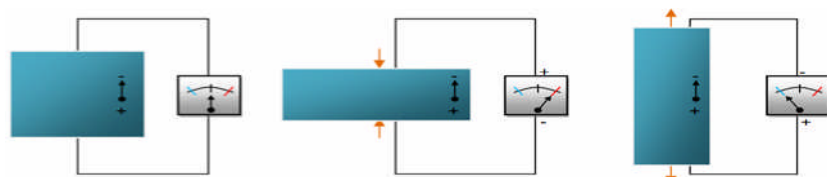


Figura 2.1 – Efeito piezoelétrico directo (Casimiro, 2009)

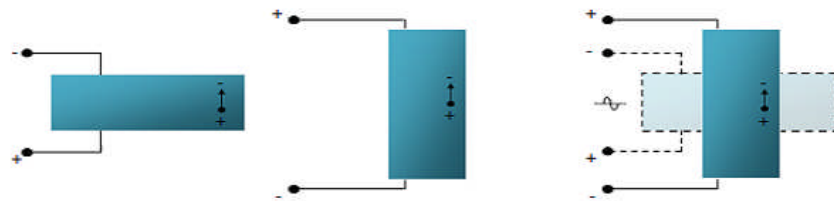


Figura 2.2 – Efeito piezoelétrico inverso (Casimiro, 2009)

Dos materiais piezoelétricos, as cerâmicas são as mais utilizadas em aplicações piezoelétricas devido à elevada constante dielétrica resultante do seu processo de polarização e da sua elevada frequência de ressonância.

Nos materiais piezoelétricos existe uma forte interacção electromecânica que pode ser traduzida, de forma simplificada pelas equações 2.1 e 2.2:

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (2.1)$$

$$S = s^E T + dE \quad (2.2)$$

onde, D é o fluxo dielétrico (C/m^2), T a pressão mecânica (N/m^2), E o campo eléctrico (N/C), S a extensão (adimensional), d a constante de carga piezoelétrica (C/N), ε^T a permissividade com T

constante (F/m) e s^E a deformabilidade com E constante (m^2/N). O comportamento dinâmico pode ser modelizado pelo seguinte circuito eléctrico equivalente:

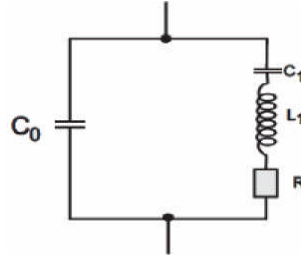


Figura 2.3 – Circuito eléctrico equivalente de unidade piezoeléctrica (Casimiro, 2009)

$C_0 + C_1$ correspondem às capacidades do dieléctrico e do circuito RLC em série que simula as alterações das propriedades mecânicas como a extensão elástica, massa efectiva (inércia) e as perdas mecânicas resultantes do atrito interno.

Os materiais piezoeléctricos têm muitos estados ou modos de oscilação que são determinados pela geometria do corpo piezoeléctrico, pelas suas propriedades mecânicas e elásticas e pela direcção da polarização. Considerando o efeito piezoeléctrico directo e sujeitando o material à compressão, tracção ou flexão, podem escrever-se diferentes equações que determinam a tensão gerada V (V) e o factor de qualidade mecânica Q (adimensional). Considerando como exemplo uma extensão por flexão, as equações para a tensão gerada numa ligação em série (Fig.2.4-a) são:

$$V_s = \frac{3FLg_{31}}{2WT} \quad (2.3)$$

$$Q_s = \frac{3FL^2d_{31}}{2T^2} \quad (2.4)$$

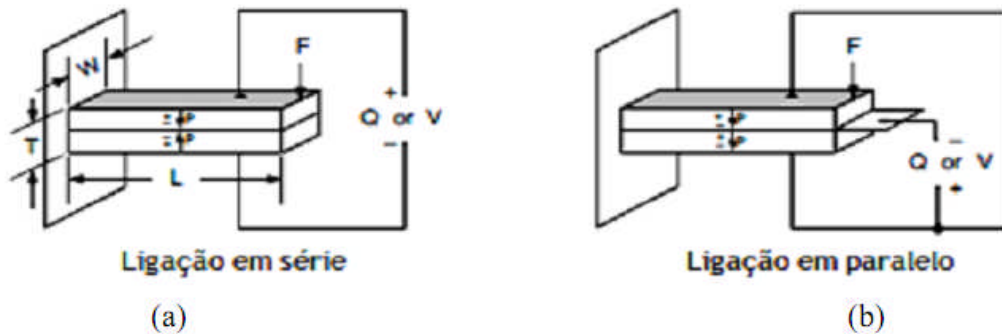


Figura 2.4 – Modos de ligação de geradores por flexão (Casimiro, 2009)

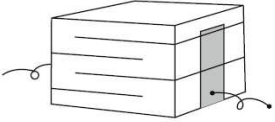

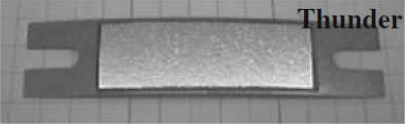
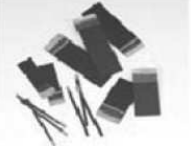

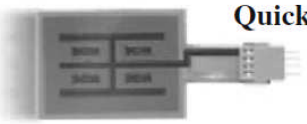

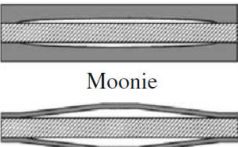
2.2 Materiais piezoelétricos

A tabela seguinte mostra os dispositivos disponíveis no mercado e mais indicados para aplicações de colheita de energia.

2.2.1 Tecnologias no mercado

Actualmente encontram-se disponíveis diversas tecnologias baseadas em materiais piezoelétricos desenvolvidas para diversos tipos de aplicações.

Tabela 2.1 – Tecnologias para colheita piezoelétrica de energia (Priya e Inman, 2009)

Tecnologia (modelo de fábrica)	Fabricante/Características
 <p>Multilayer</p>	<p>Fabricante: Morgan electroceramics, APC International, Tokin, PI.</p> <p>Características: baixa frequência (~10 Hz), indicado para grandes tensões mecânicas num só sentido, fácil montagem.</p>
 <p>Macro Fiber Composite (MFC)</p>	<p>Fabricante: Smart Material.</p> <p>Características: flexível, opera tanto no modo d_{33} como d_{31}, aplicações de alta frequência e pequenas deformações, cobre grandes superfícies e pode ser usado segundo uma tipologia dupla.</p>
 <p>Thunder</p>	<p>Fabricante: Face International.</p> <p>Características: aplicável para diversas curvaturas e pesos fornecendo uma grande amplificação da tensão mecânica, indicado para muito baixa frequência (~1 Hz).</p>
 <p>Bimorphs</p>	<p>Fabricante: APC International.</p> <p>Características: ressonância ajustável entre os 5 e os 100 Hz, usado em várias aplicações como vigas oscilantes, diafragma e outros.</p>
 <p>Amplified Piezoelectric Actuator</p>	<p>Fabricante: Cedrat.</p> <p>Características: altamente eficiente sobre grandes tensões mecânicas ressonâncias ajustáveis em grandes gamas (~100 Hz).</p>
 <p>QuickPack</p>	<p>Fabricante: Mide.</p> <p>Características: semelhante aos bimorphs (duplos) mas mais simples de montar, grande largura de banda, amplamente usada em configuração de encastramento.</p>
 <p>Rainbow</p>	<p>Características: superfície curva resultando num maior aproveitamento sobre uma dada tensão mecânica, pode ser empilhado para amplificar a carga.</p>
 <p>Moonie</p> <p>Cymbal</p>	<p>Fabricante: Micromechatronics.</p> <p>Características: capas metálicas revestindo a parte cerâmica permitem aplicações de alta tensão mecânica, alto carregamento devido à amplificação da tensão mecânica, ressonâncias variáveis por alteração das dimensões dos revestimentos metálicos e do material.</p>

2.2.2 Colector de Energia Mecânica com fibras piezoelétricas

O Compósito de Macro Fibras (MFC) é o actuador discreto líder de mercado e um sensor de alta performance, durabilidade e flexibilidade num dispositivo de baixo custo. O MFC foi inventado em 1996 nos laboratórios da NASA e desde então tem sido desenvolvido. O fabricante Smart Material iniciou a produção e distribuição do MFC em 2002. Desde então o MFC tem sido desenvolvido no sentido de satisfazer as necessidades de cada cliente em particular, existindo actualmente cerca de 23 tipos de modelos diferentes.

Esta tecnologia permite a produção de actuadores em fibra perfeitamente alinhados com uma espessura inferior a alguns décimos do milímetro.

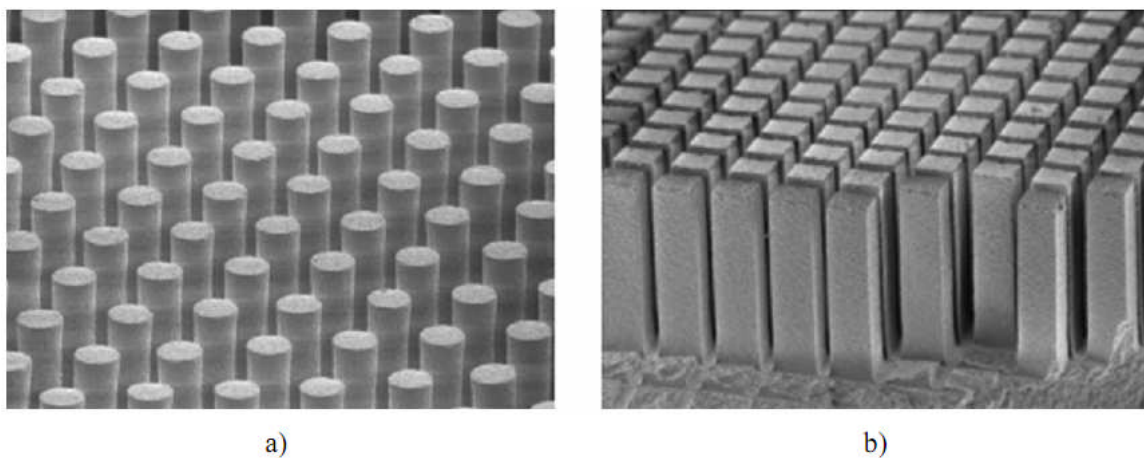


Figura 2.5 – Barras de Fibras Piezocerâmicas: a) circulares; b) retangulares (Sodano, 2003)

Estruturalmente o MFC consiste em sanduíches de barras piezocerâmicas retangulares aplicadas entre camadas adesivas, eléctrodos e película de poliimida.

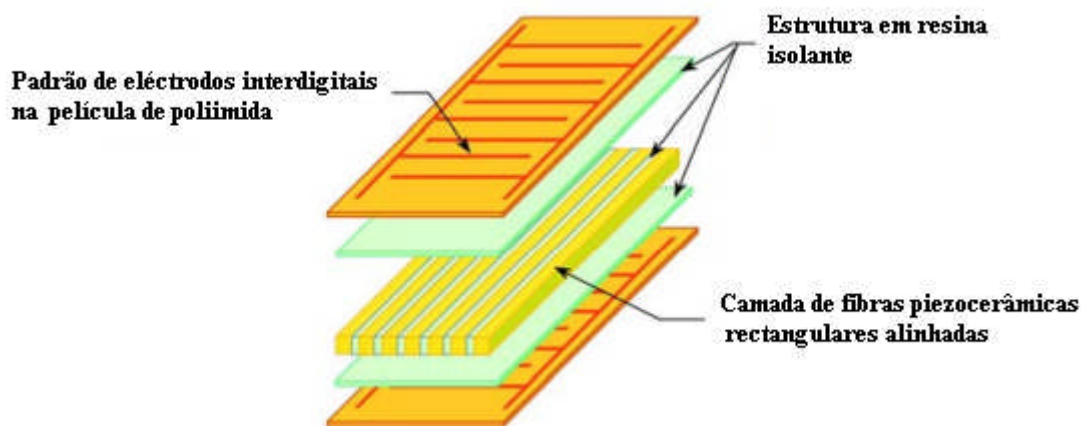


Figura 2.6 – Esquema da estrutura do MFC (Smart Material, 2009)

Os eléctrodos são associados na película segundo um padrão interdigital que transfere a tensão eléctrica aplicada directamente das e para as barras em forma de fita.

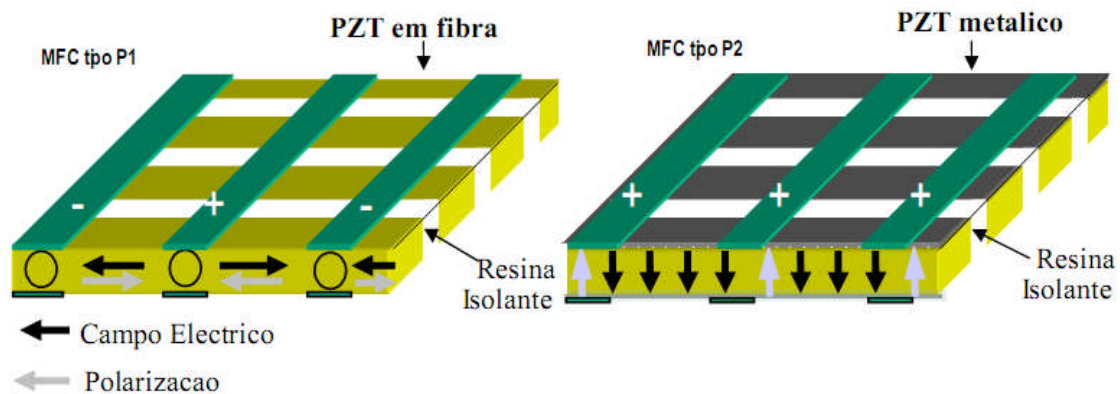


Figura 2.7 – Estrutura dos colectores piezoelétricos MFC (Smart Material, 2010)

Existem dois modos comuns de colheita piezoelétrica de energia: o modo 33 (característico dos coletores MFC do tipo P1) e o modo 31 (característico dos coletores MFC do tipo P2). No modo 33 a direcção da tensão mecânica aplicada (força) e a tensão gerada com a polarização do material são a mesma, enquanto no modo 31 a tensão mecânica é aplicada segundo um eixo perpendicular ao da polarização.

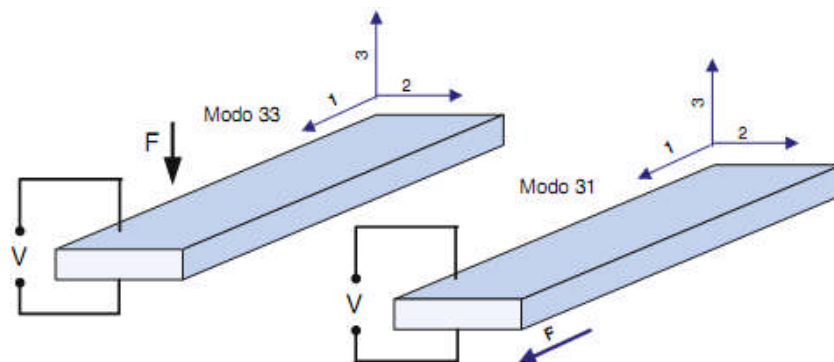


Figura 2.8 – Modos operativos do sensor piezoelétrico (Priya e Inman, 2009)

Esta montagem permite uma polarização no plano, actuação e transdução numa embalagem selada resistente (com uma longevidade de 10^9 ciclos de máxima extensão) e de fácil utilização. Enquanto folha fina e ajustável a célula pode ser aplicada (normalmente soldada) em vários tipos de estruturas ou incorporada numa estrutura composta.

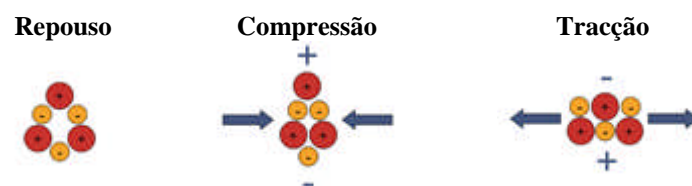


Figura 2.9 – Esquema atómico do Efeito Piezoelétrico (Amby, 2006)

Se uma tensão eléctrica for aplicada esta dobra ou deforma o material do substrato ou gera vibrações.

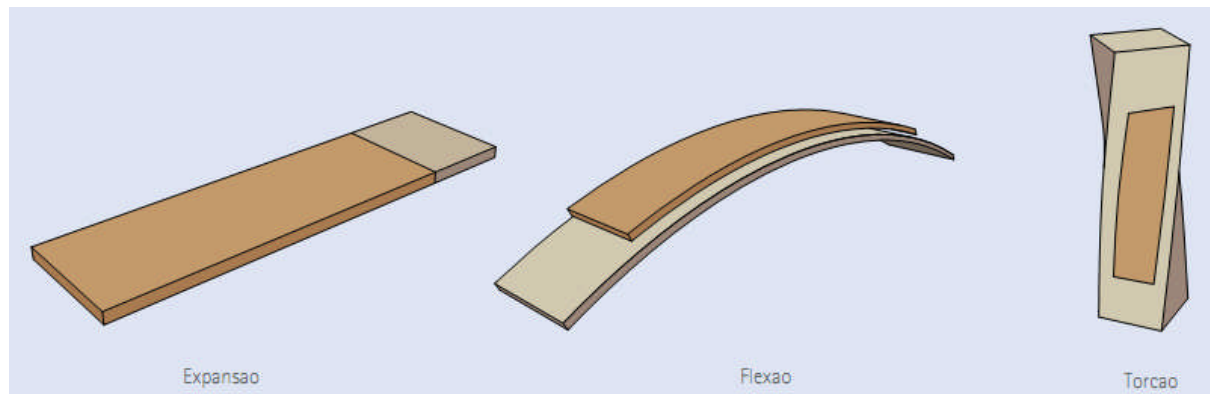


Figura 2.10 – Tipos de deformações (Smart Material, 2010)

Na ausência da aplicação de tensão eléctrica pode funcionar como uma célula de alta sensibilidade às deformações, ao ruído e às vibrações ou pode ser colhida energia desta.

Os novos modelos com MFC permitem a monitorização precisa de estruturas, alteração da forma e enrijecimento de estruturas, geração de ondas lambda e ultra-sons de grandes áreas (compostos do tipo 2-2).



Figura 2.11 – Modelos de colectores com tecnologia MFC (Smart Material, 2010)

Os perfis planos dos MFC e a capacidade de simultaneamente actuarem como actuadores e sensores permitem o seu uso em diversas zonas críticas e de difícil acesso. O MFC está disponível nos modos operacionais d_{33} (maior velocidade de conversão de energia) e d_{31} (maior corrente), que é característica do MFC.

2.3 Aplicações de colectores piezoelétricos

2.3.1 Controlo das Vibrações

Uma aplicação de interesse consiste em aplicar as células de MFC na cauda vertical de aviões. Aplicam-se 5 actuadores de MFC em cada face das duas caudas sobre a camada em fibra de vidro (Fig.2.12). Estes actuadores actuam como meio de compensar as tensões mecânicas de torção e dobragem que são provocadas durante o voo devido à turbulência resultante do atrito mecânico do ar.

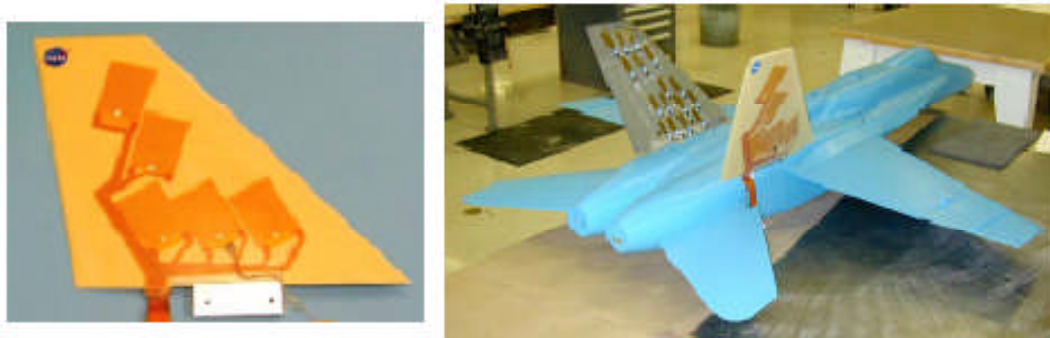


Figura 2.12 – Modelo em escala da cauda de avião com células MFC (Sodano, 2003)

2.3.2 Colheita Piezoelétrica de Energia

2.3.2.1 Colheita em turbinas eólicas

A Fig.2.13 mostra a turbina eólica piezoelétrica da American Windmills (em escala reduzida) e usa o movimento das pás para activar uma manivela que deflete duas filas de 9 unidades piezoelétricas duplas. A passagem da manivela resulta na vibração das células que podem fornecer energia a dispositivos que funcionam numa gama de 10 a 50 mW (sensores de temperatura, de pressão, de luz, interruptores e alarmes).

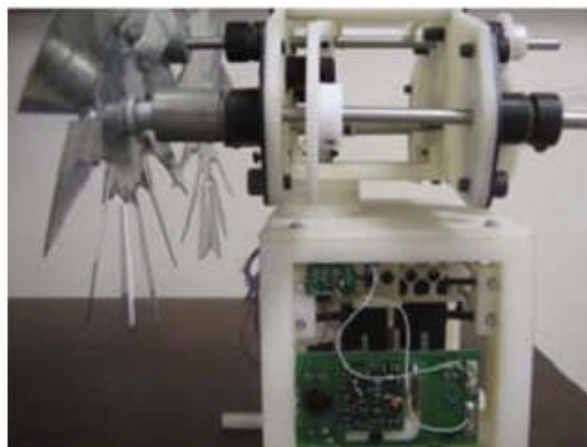


Figura 2.13 – Turbina eólica piezoelétrica da American Windmills (Priya e Inman, 2009)

2.3.2.2 Colectores piezocerâmicos em UAV

A energia de vibração nas asas de aviões não tripulados (UAV) durante o voo pode ser captada para fornecer energia à parte eléctrica e consequentemente aumentar o tempo de voo.



Figura 2.14 – Avião não tripulado Hermes 450 (EDA, 2010)

O processo consiste em aplicar sobre a superfície das asas do UAV unidades duplas piezocerâmicas ligadas em série, sem que com isso se altere a sua massa ou a geometria. Estudos nesta área registaram potências por aceleração (no ponto de medição) na ordem dos $157,72 \text{ mW/g}^2$, sendo $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

2.3.2.3 Colheita com uma mochila

O colector de alças consiste num sistema de colheita que converte o peso de uma mochila em energia variando em função do andar do seu utilizador [3].

O sistema de conversão consiste numa pilha de actuadores ligada em cada uma das alças para receber a força do peso da mochila.



Figura 2.15 – Amplificador de pilha na alça da mochila (Feenstra, 2008)

Os resultados obtidos mostraram que com este dispositivo é possível obter um valor médio de potência de $0,4 \text{ mW}$.

2.3.2.4 Colheita num salto de um sapato

O salto colector é um sistema de conversão em energia eléctrica da força exercida no salto de um sapato pelo peso de uma pessoa durante o caminhar [4].

O sistema de conversão consiste num gerador em forma de salto que pode ser incorporado num sapato sem causar desconforto ou alteração no design do calçado.



Figura 2.16 – Gerador em forma de salto de sapato (Howells, 2009)

Os resultados obtidos mostraram que com este dispositivo é possível obter um valor médio de potência 90,3 mW por passada.

2.3.2.5 Colheita nas palmilhas dos ténis

A palmilha colectora é um sistema de conversão em energia eléctrica da extensão de uma palminha nos ténis resultante do peso que o corpo exerce durante o caminhar normal ou em actividades físicas [6].

O sistema de conversão consiste numa película aplicada sobre uma palmilha fina que reveste o interior do calçado, armazenando a energia num sistema de baterias.



Figura 2.17 – Protótipo de uma palmilha piezoeléctrica (Mateu, 2006)

2.3.2.6 Pavimento piezoelétrico

Na feira de ciência Portugal Tecnológico 2009 foi apresentado um estudo de Filipe Casimiro, Pedro Gaspar e Luís Gonçalves do Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior [1]. Este estudo foi gentilmente cedido pelos autores para a realização da presente dissertação. A solução escolhida consistiu em apoiar a superfície de cada bloco (fracção do pavimento) em quatro apoios, compostos por um cilindro no qual se encontra inserida uma haste e uma mola. O cilindro e a haste garantem um movimento vertical uniforme e limitam o grau de oscilação, enquanto a mola permite a oscilação da superfície e ainda suporta o peso de quem nela caminha.

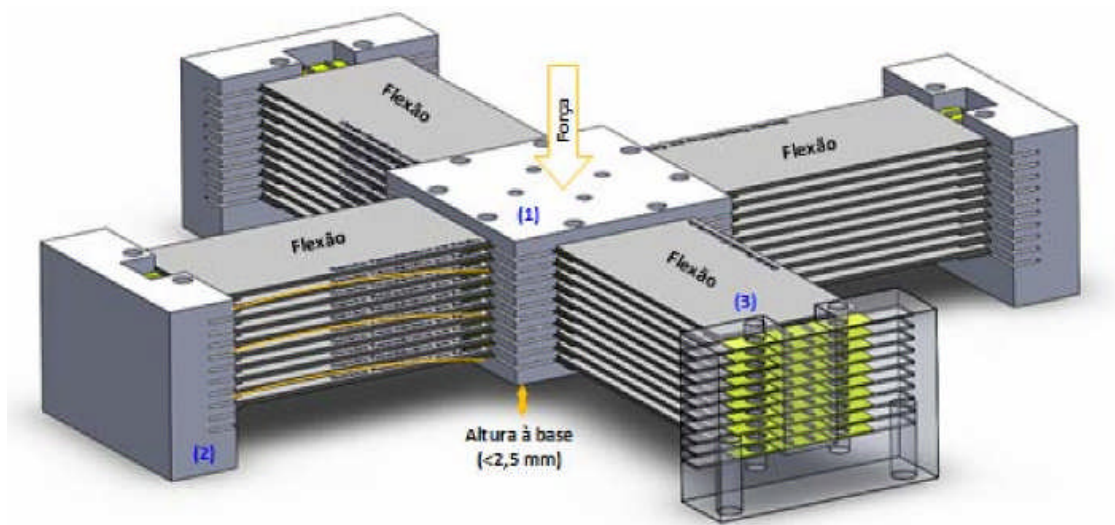


Figura 2.18 – Mecanismo de geração: Agrupamento do pistão oscilador (1), encastramentos (2) e geradores piezoelétricos (3). Exemplo de flexão por acção de uma força externa (Casimiro, 2009)

2.3.2.6.1 Estimativa de produção de energia eléctrica

Supondo que o caminhar corresponde a dois passos por segundo, ou seja, a uma frequência (f) de 2 Hz, e admitindo que cada passo corresponde à actuação de um bloco gerador, pode calcular-se a corrente produzida por cada um, com a seguinte equação:

$$I_{\max} = I_{p_{\max}} \times f \times n \quad (2.5)$$

Considerando também que cada bloco gerador tem 40 elementos piezoelétricos (n), a corrente total gerada (I_{\max}) por cada bloco gerador é de 2,28 mA o que pressupõe uma potência estimada de 284 mW.

2.3.2.6.2 Protótipo

De modo a viabilizar a aplicação, foi construído um protótipo em miniatura, denominado *PIZO*, em que se realizaram vários testes, mostrando-se estes bastante positivos, nomeadamente em relação à corrente total medida (cerca de 5 mA) tendo em conta que foram utilizados apenas quatro geradores piezoelétricos. Este protótipo armazena a energia gerada em quatro condensadores (33 μ F) sendo capaz, após algumas actuações sobre ele, de acender os seus quatro leds (de 1,5 mA cada) durante cerca de um segundo.



Figura 2.19 – Protótipo do projecto PIZO (Casimiro, 2009)

2.3.2.6.3 Locais de aplicação

A aplicação do pavimento piezoelétrico é destinada a locais que tenham uma grande afluência de pessoas, como centros comerciais, aeroportos, estações de metro e comboio de modo a aumentar a sua eficácia. A confluência de pessoas por uma determinada área, como bilheteiras, é também uma forma de tornar este sistema mais eficaz. Pode ainda expandir-se este princípio para aplicações militares e até mesmo estradas rodoviárias.

O pavimento piezoelétrico no Bar Surya em Londres gera cerca de 60% das suas necessidades energéticas (cada cliente produz entre 5 e 60 Watts)



Figura 2.20 – Bar Surya em Londres (Google, 2010)

3. Circuito Eléctrico

3.1 Introdução

Considere-se um dispositivo de conversão de energia que inclui uma estrutura piezoelétrica vibrante associada a um sistema de armazenamento de energia. Se a estrutura vibrar em torno da sua ressonância, o colector pode ser visto como uma estrutura mecânica (massa+mola+amortecedor+célula piezoelétrica) tal como mostra a figura seguinte:

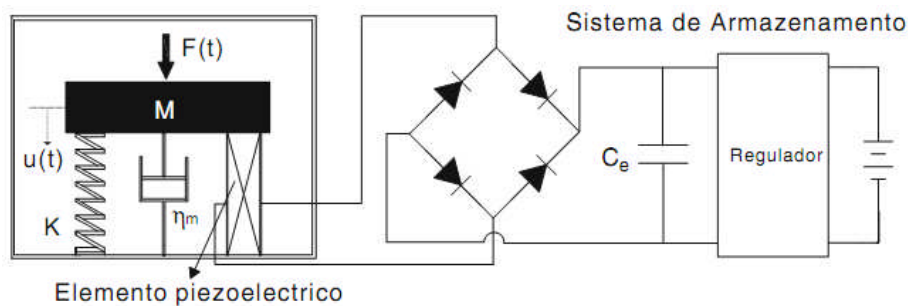


Figura 3.1 – Modelo equivalente do sistema colheita piezoelétrica das vibrações (Priya e Inman, 2009)

A Fig.3.1 consiste num elemento piezoelétrico acoplado a uma estrutura mecânica. Nesta abordagem, uma função força $F(t)$ é aplicada no sistema e a massa efectiva M (massa equivalente) comprime uma mola de rigidez efectiva K (rigidez equivalente), num amortecedor com coeficiente de amortecimento η_m , e numa célula piezoelétrica caracterizada por um coeficiente piezoelétrico efectivo Θ e capacidade C_p .

Por exemplo, considere-se um flexor de tripla camada montado como uma viga oscilante com uma polarização ao longo da direcção da sua espessura, tal como mostrado na Fig.3.2:

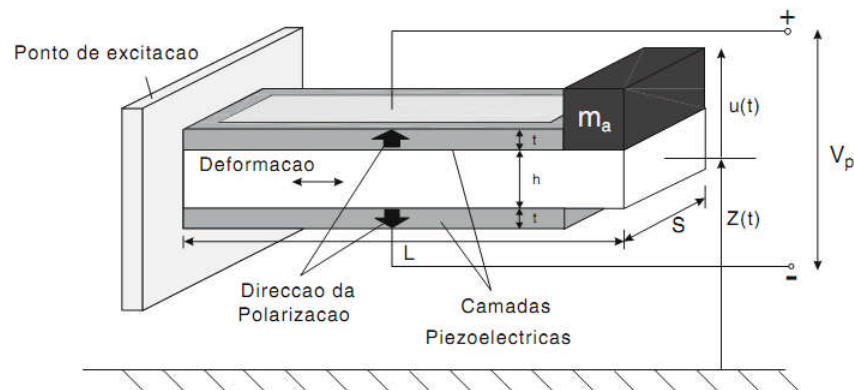


Figura 3.2 – Gerador piezoelétrico: viga com flexor de tripla camada (Priya e Inman, 2009)

O campo eléctrico é gerado segundo a espessura das células piezoeléctricas, enquanto a extensão é segundo a direcção axial, consequentemente, é usado o modo transversal ou 3-1.

$$\begin{aligned}
 M &= \beta_M (m_p + m_b) + m_a \\
 K &= \beta_K S \left\{ \left(\frac{2}{3} \frac{t^3}{L^3} + \frac{ht^2}{L^3} + \frac{1}{2} \frac{th^2}{L^3} \right) C_{p11}^E + \frac{1}{12} \frac{h^3}{L^3} C_{b11}^E \right\} \\
 \Theta &= \beta_\Theta \frac{S(h+t)}{2L} e_{31} \\
 C_p &= \frac{SL}{2t} \epsilon_{33}^S
 \end{aligned}$$

Em que β_M , β_K e β_Θ são as constantes da aproximação de Rayleigh-Ritz, e_{31} a constante dieléctrica da célula piezoeléctrica e ϵ_{33}^S a constante dieléctrica no ponto de excitação, S a largura e L o comprimento da viga oscilante, t e h as espessuras, C_{p11}^E e C_{b11}^E os módulos elásticos, m_p a massa da célula piezoeléctrica, m_b a massa das camadas das células centrais passivas e m_a a massa de prova.

Seja u o deslocamento da massa M e V_p a tensão eléctrica ao longo da célula piezoeléctrica. As equações de forças que regem o movimento de vibração do elemento piezoeléctrico são:

$$M\ddot{u}(t) + \eta_m \dot{u}(t) + Ku(t) + \Theta V_p(t) = F(t) \quad (3.1)$$

$$-\Theta \dot{u}(t) + C_p \dot{V}_p(t) = -I(t) \quad (3.2)$$

Onde $I(t)$ é a corrente que circula no circuito tal como mostra a Fig.3.3:

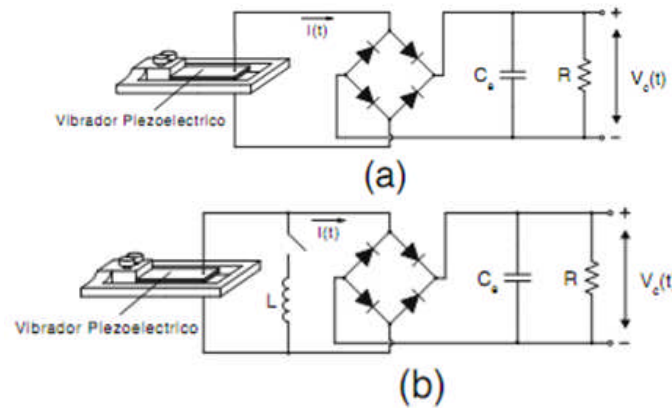


Figura 3.3 – Esquema do circuito eléctrico para colheita de energia:
a) Circuito Standard, b) Interface SSHI (Priya e Inman, 2009)

Uma vez que a maioria dos dispositivos piezoelétricos para geração de energia envolvem o uso de oscilações periódicas das componentes piezoelétricas, considera-se que o gerador vibrante é controlado em torno da ressonância pela excitação harmónica:

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t) \quad (3.3)$$

Onde F_0 é o módulo da amplitude da força e ω (em radianos por segundo) a frequência angular de vibração.

O gerador está ligado a um circuito de armazenamento, tal como na Fig.3.1. Como a pilha necessita de uma tensão DC, enquanto uma célula piezoelétrica produz uma tensão AC, é necessário um rectificador AC-DC com um condensador de filtragem (com capacidade C_e) para alisar a tensão contínua. Em paralelo um controlador entre o rectificador e a pilha para regular a tensão eléctrica de saída. A Fig.3.3 é o circuito de colheita de energia simplificado normalmente usado na análise do projecto. Pode ser usado para estimar um limite superior da potência real que um gerador piezoelétrico é capaz de produzir para uma dada excitação. Notar que o circuito de regulação e a pilha são substituídos por uma resistência equivalente R e na qual se mede uma tensão contínua V_c .

A abordagem comum para se obter uma tensão eléctrica contínua na saída é assumir que o condensador de filtragem C_e é suficientemente grande tal que a tensão eléctrica rectificada V_c é constante. Especificamente: $V_c = \langle V_c(t) \rangle + V_{ripple}$ onde $\langle V_c(t) \rangle$ é o valor médio da tensão e V_{ripple} a tensão de ondulação. O valor médio $\langle V_c(t) \rangle$ é independente do valor C_e fornecido tal que a constante de tempo RC_e é muito maior que o período de oscilação do gerador [5]. Na hipótese de $V_c \approx \langle V_c(t) \rangle$, portanto $V_{ripple} \cong 0$ usa-se V_c para representar o valor médio da tensão.

A ponte rectificadora, teoricamente ideal, está em aberto sempre que a tensão piezoelétrica $|V_p|$ é inferior à tensão rectificada V_c . Consequentemente, a corrente que flui no circuito desaparece, e tal implica que $\dot{V}_p(t)$ varia proporcionalmente com $\dot{u}(t)$. Por outro lado, quando $|V_p|$ iguala V_c , a ponte conduz e a tensão piezoelétrica é mantida igual à tensão rectificada, $|V_p| = V_c$. Finalmente, a condução nos díodos rectificadores é bloqueada novamente quando o valor absoluto da tensão piezoelétrica $|V_p(t)|$ começa a diminuir. Assim, a tensão piezoelétrica $V_p(t)$ varia proporcionalmente com o deslocamento $u(t)$ quando a ponte rectificadora é bloqueada ou então é igual a V_c quando a ponte conduz.

As equações 3.1, 3.2 e 3.3 foram desenvolvidas num modo ressonante do dispositivo, e portanto espera-se uma vibração em regime estacionário dada por:

$$u(t) = u_0 \sin(\omega t - \theta) \quad (3.4)$$

Com u_0 a amplitude e θ o desfasamento.

Seja $T = \frac{2\pi}{\omega}$ o período da vibração, e t_i e t_f os dois instantes de tempo ($t_f - t_i = \frac{T}{2}$) tal que o deslocamento u varia entre o mínimo $-u_0$ e o máximo u_0 , tal como mostra a Fig.3.4a. Assumindo que $\dot{V}_p \geq 0$ durante o semi-período deste t_i a t_f . Segue-se que $\int_{t_i}^{t_f} \dot{V}_p(t) dt = V_c - (-V_c) = 2V_c$. Notar que $C_e \dot{V}_c(t) + \frac{V_c}{R} = 0$ para $t_i < t < t^*$ durante a qual a tensão piezoelétrica $|V_p| < V_c$ e $I(t) = C_e \dot{V}_c(t) + \frac{V_c}{R}$ para $t^* < t < t_f$ durante o qual o rectificador conduz. Resultando que:

$$-\int_{t_i}^{t_f} I(t) dt = -\frac{T}{2} \frac{V_c}{R}$$

Como em regime estacionário o valor médio da corrente no condensador de capacidade C_e é nulo, logo $\int_{t_i}^{t_f} I(t) dt = 0$. A integração de 3.2 entre o instante t_i e t_f fica:

$$-2\Theta u_0 + 2C_p V_c = -\frac{T}{2} \frac{V_c}{R}$$

Ou,

$$V_c = \frac{\omega \Theta R}{\omega C_p R + \frac{\pi}{2}} u_0 \quad (3.5)$$

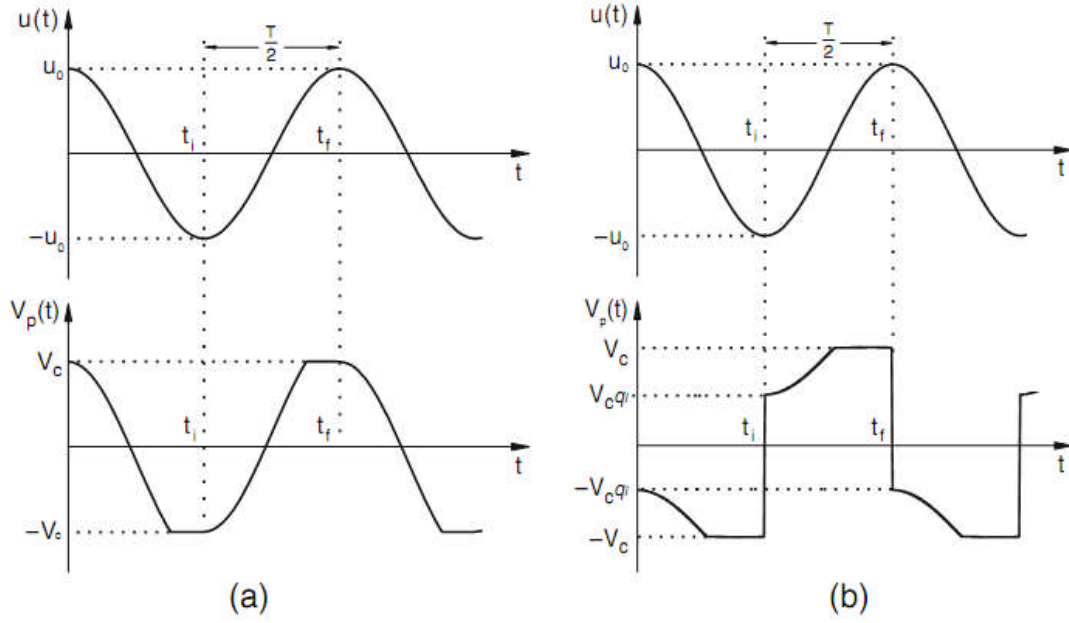


Figura 3.4 – Formas de onda típica do deslocamento e tensão piezoelétrica:
a) Standard, b) Interface SSHI (Priya e Inman, 2009)

Então, da equação 3.5, tem que ser calculado u_0 para determinar V_c . Existem três abordagens possíveis para o determinar. Na primeira considera-se o dispositivo piezoelétrico uma fonte de corrente em paralelo com capacidade C_p . Baseado no pressuposto que a fonte de corrente interna do gerador é independente da impedância externa de carga. Contudo, a amplitude da fonte de corrente está directamente associada ao deslocamento, que depende não apenas do amortecimento mecânico mas também do amortecimento eléctrico na vibração ressonante (Lesieutre, 2004).

Existe um modelo no qual é tido em conta o efeito do desfasamento entre a função força externa e a velocidade da massa, e deduziram as expressões analíticas da amplitude do deslocamento u_0 , tensão eléctrica rectificada V_c , e valor médio da potência eléctrica colhida P . Os resultados são apresentados de seguida:

$$\bar{u}_0 = \frac{u_0}{\frac{F_0}{K}} = \frac{1}{\left\{ \left(2\zeta_m + \frac{2k_e^2 r}{\left(r\Omega + \frac{\pi}{2} \right)^2} \right)^2 \Omega^2 + \left(1 - \Omega^2 + \frac{k_e^2 r \Omega}{r\Omega + \frac{\pi}{2}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (3.6)$$

$$\bar{V}_c = \frac{V_c}{F_0} = \left(\frac{r\Omega}{r\Omega + \frac{\pi}{2}} \right) \frac{k_e^2}{\left\{ \left(2\zeta_m + \frac{2k_e^2 r}{\left(r\Omega + \frac{\pi}{2} \right)^2} \right)^2 \Omega^2 + \left(1 - \Omega^2 + \frac{k_e^2 r\Omega}{r\Omega + \frac{\pi}{2}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (3.7)$$

$$\bar{P} = \frac{P}{\frac{F_0^2}{\omega_{sc} M}} = \frac{1}{\left(r\Omega + \frac{\pi}{2} \right)^2} \frac{k_e^2 \Omega^2 r}{\left(2\zeta_m + \frac{2k_e^2 r}{\left(r\Omega + \frac{\pi}{2} \right)^2} \right)^2 \Omega^2 + \left(1 - \Omega^2 + \frac{k_e^2 r\Omega}{r\Omega + \frac{\pi}{2}} \right)^2} \quad (3.8)$$

Onde diversas variáveis adimensionais são introduzidas como:

$$k_e^2 = \frac{\Theta^2}{KC_p}, \quad \zeta_m = \frac{\eta_m}{2\sqrt{KM}}, \quad \omega_{sc} = \sqrt{\frac{K}{M}}, \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_{sc}}, \quad r = C_p \omega_{sc} R \quad (3.9)$$

Em cima, k_e^2 é o coeficiente de acoplamento electromecânico alternativo, ζ_m é a razão ou proporção de resistência do ar, ω_{sc} é a frequência natural de oscilação (do vibrador piezoeléctrico em curto-circuito), a frequência normalizada Ω e a resistência eléctrica r . Notar que existem duas ressonâncias no sistema uma vez que a célula piezoeléctrica exibe rigidez tanto em curto-circuito como em aberto. Essas frequências estão definidas como:

$$\Omega_{sc} = 1, \quad \Omega_{oc} = \sqrt{1 + k_e^2} \quad (3.10)$$

Em que Ω_{sc} e Ω_{oc} são as razões de frequência de curto-circuito e circuito aberto, respectivamente. O desfasamento à frequência natural do dispositivo é contabilizado para um k_e^2 alto.

3.2 SSHI-Circuito de Colheita

Um SSHI (*Synchronized Switch Harvesting on Inductor*) é uma interface electrónica que consiste em adicionar um comutador (switch) em série com uma bobine de indutância L que estão em paralelo com a célula piezoelétrica, tal como na Fig.3.3b. O switch electrónico é disparado de acordo com a máximo e o mínimo do deslocamento da massa, permitindo o processamento sincronizado da tensão piezoelétrica com valores extremos de deslocamento.

Para ilustrar o comportamento eléctrico do processamento não linear deste circuito, considera-se a excitação harmónica. Visto como uma excitação no ponto de excitação (de modo único), o deslocamento mecânico $u(t)$ considera-se sinusoidal. A forma de onda da tensão eléctrica piezoelétrica $V_p(t)$ pode contudo não ser sinusoidal e está dependente de um tipo específico do

circuito de interface associado à célula piezoelétrica. Por exemplo, seja $T = \frac{2\pi}{\omega}$ o período da

excitação mecânica e t_i e t_f dois instantes de tempo tais que o deslocamento $u(t)$ varia entre $-u_0$ e u_0 , tal como mostra a Fig.3.4b. O switch está desligado durante o intervalo (t_i^+, t_f) . Quando é ligado

no instante t_i , $|V_p(t)|$ permanece menor que tensão rectificada V_c . Então a ponte rectificadora é colocada em aberto, e é estabelecido um circuito oscilador composto pela bobine de indutância L e a capacidade piezoelétrica C_p , permitindo uma inversão do processo para a tensão piezoelétrica V_p .

Especificamente, seja Δt metade do período eléctrico do circuito oscilador $L - C_p$. Sendo:

$$\Delta t = \pi \sqrt{LC_p}$$

Assume-se que o processo de inversão é quasi-instantâneo no sentido em que o tempo de inversão é dimensionado para ser muito menor que o período da vibração mecânica: $\Delta t = t_i^+ - t_i \ll T$. O switch é mantido fechado durante este pequeno intervalo de tempo Δt , resultando na inversão da tensão na célula piezoelétrica.

$$V_p(t_i^+) = -V_p(t_i) e^{\frac{-\pi}{2Q_I}} = V_c q_I, \quad q_I = e^{\frac{-\pi}{2Q_I}} \quad (3.11)$$

Tal como mostrado na Fig.3.4b. O parâmetro Q_I é o factor de qualidade da inversão resultante da perda de energia principalmente do indutor em série com o switch. Daqui resulta que a corrente que circula da célula piezoelétrica para o rectificador durante meio período de vibração pode ser obtida integrando a equação 3.2 entre t_i^+ e t_f :

$$\int_{t_i^+}^{t_f} \{-\Theta \dot{u}(t) + C_p \dot{V}_p(t)\} dt = -2\Theta u_0 + Cp \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q_I}}\right) V_c = -\frac{T}{2} \frac{V_c}{R}$$

Uma vez que a ponte rectificadora está a bloqueando durante o processo de inversão e a duração da inversão $\Delta t \ll T$. A relação entre a amplitude do deslocamento u_0 e a tensão eléctrica rectificadora V_c é então obtida como:

$$V_c = \frac{2R\Theta\omega}{(1-q_I)C_p R\omega + \pi} u_0 \quad (3.12)$$

O resto da dedução consiste em estimar a amplitude do deslocamento u_0 e o desfasamento θ . Os resultados da amplitude do deslocamento normalizado \bar{u}_0^{SSH} , tensão eléctrica rectificadora \bar{V}_c^{SSH} , e o valor médio da potência colhida \bar{P}^{SSH} são dados por:

$$\bar{u}_0^{SSH} = \frac{u_0^{SSH}}{\frac{F_0}{K}} = \frac{1}{\left\{ \left(2\zeta_m + \frac{2 \left[1 + \frac{r\Omega}{2\pi} (1-q_I^2) \right] k_e^2 r}{\left(\frac{(1-q_I)}{2} r\Omega + \frac{\pi}{2} \right)^2} \right)^2 \Omega^2 + \left(1 - \Omega^2 + \frac{\frac{(1-q_I)}{2} k_e^2 r\Omega}{\frac{(1-q_I)}{2} r\Omega + \frac{\pi}{2}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (3.13)$$

$$\bar{V}_c^{SSH} = \frac{V_c^{SSH}}{\frac{F_0}{\Theta}} = \left(\frac{r\Omega}{\frac{(1-q_I)}{2} r\Omega + \frac{\pi}{2}} \right) \frac{k_e^2}{\left\{ \left(2\zeta_m + \frac{2 \left[1 + \frac{r\Omega}{2\pi} (1-q_I^2) \right] k_e^2 r}{\left(\frac{(1-q_I)}{2} r\Omega + \frac{\pi}{2} \right)^2} \right)^2 \Omega^2 + \left(1 - \Omega^2 + \frac{\frac{(1-q_I)}{2} k_e^2 r\Omega}{\frac{(1-q_I)}{2} r\Omega + \frac{\pi}{2}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (3.14)$$

$$\bar{P}^{SSH} = \frac{P^{SSH}}{\frac{F_0^2}{\omega_{sc} M}} = \frac{1}{\left(\frac{(1-q_I)}{2} r\Omega + \frac{\pi}{2} \right)^2} \frac{k_e^2 \Omega^2 r}{\left\{ \left(2\zeta_m + \frac{2 \left[1 + \frac{r\Omega}{2\pi} (1-q_I^2) \right] k_e^2 r}{\left(\frac{(1-q_I)}{2} r\Omega + \frac{\pi}{2} \right)^2} \right)^2 \Omega^2 + \left(1 - \Omega^2 + \frac{\frac{(1-q_I)}{2} k_e^2 r\Omega}{\frac{(1-q_I)}{2} r\Omega + \frac{\pi}{2}} \right)^2 \right\}^2} \quad (3.15)$$

Existe ainda um pressuposto em fase para analisar a performance eléctrica do gerador com uma interface SSHI [5]. Mais precisamente, assume-se que a função força externa e a velocidade da massa estão em fase, dando o aumento para o efeito de desfaseamento nulo na sua formulação. As equações seguintes sumarizam os resultados obtidos para comparação:

$$\bar{u}_{in-phase}^{SSH} = \frac{u_{in-phase}^{SSH}}{\frac{F_0}{K}} = \frac{1}{\left\{ 2\zeta_m + \frac{2 \left[1 + \frac{r\Omega}{2\pi} (1 - q_I^2) \right] k_e^2 r}{\left(\frac{(1 - q_I)}{2} r\Omega + \frac{\pi}{2} \right)^2} \right\} \Omega} \quad (3.16)$$

$$\bar{V}_{in-phase}^{SSH} = \frac{V_{in-phase}^{SSH}}{\frac{F_0}{\Theta}} = \left(\frac{r\Omega}{\frac{(1 - q_I)}{2} r\Omega + \frac{\pi}{2}} \right) \frac{k_e^2}{\left\{ 2\zeta_m + \frac{2 \left[1 + \frac{r\Omega}{2\pi} (1 - q_I^2) \right] k_e^2 r}{\left(\frac{(1 - q_I)}{2} r\Omega + \frac{\pi}{2} \right)^2} \right\}} \quad (3.17)$$

$$\bar{P}_{in-phase}^{SSH} = \frac{P_{in-phase}^{SSH}}{\frac{F_0^2}{\omega_{sc} M}} = \frac{1}{\left(\frac{(1 - q_I)}{2} r\Omega + \frac{\pi}{2} \right)^2} \frac{k_e^2 r}{\left\{ 2\zeta_m + \frac{2 \left[1 + \frac{r\Omega}{2\pi} (1 - q_I^2) \right] k_e^2 r}{\left(\frac{(1 - q_I)}{2} r\Omega + \frac{\pi}{2} \right)^2} \right\}^2} \quad (3.18)$$

3.3 Conclusões

As expressões anteriores indicam que a frequência de excitação e a amplitude de oscilação da estrutura são duas variáveis com as quais se pode maximizar os valores de tensão e potência obtidos.

Os restantes parâmetros são constantes características ou do material da estrutura suporte (como a rigidez) ou dependentes da tecnologia piezoeléctrica usada (como os coeficientes piezoeléctricos).

As tensões e potências extraídas deste tipo de aproveitamentos estão ainda dependentes dos valores das impedâncias de carga que lhe são associadas, podendo ser facilmente reguladas no sentido de maximizar estas grandezas eléctricas.

4. Técnicas Não-Lineares

4.1 Introdução

A energia convertida de uma célula piezoelétrica pode ser armazenada ou directamente consumida. Contudo, as estratégias de controlo são diferentes caso o objectivo final seja controlar as vibrações ou usar a energia convertida para alimentar um circuito electrónico.

Neste capítulo são apresentadas algumas das técnicas mais comuns para a maximização da potência eléctrica em colheita de energia neste tipo de dispositivos.

4.2 Modelação

É aqui proposto um modelo unitário para uma estrutura de instrumentos tal como mostra a Fig.4.1:

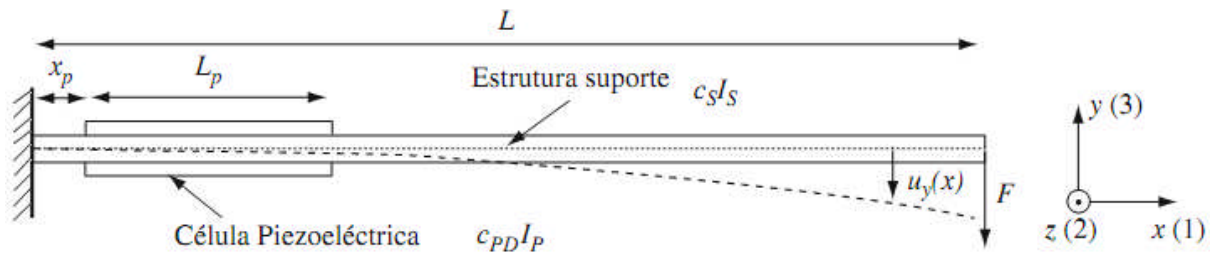


Figura 4.1 – Estrutura vibrante com células piezoelétricas na superfície (Priya e Inman, 2009)

Este modelo resulta das equações fundamentais piezoelétricas dadas pela equação 4.1:

$$\begin{cases} D = dT + \varepsilon^T E \\ S = s^E T + dE \end{cases} \quad (4.1)$$

Sendo S a extensão, T a tensão mecânica, E o campo eléctrico, D o campo de indução, s^E a deformabilidade da célula piezoelétrica em curto-circuito, d a constante piezoelétrica e ε^T a constante dielétrica do material piezoelétrico a tensão mecânica constante. Este sistema de equações permite fazer uma análise das técnicas de amortecimento da vibração e da colheita de energia.

Nesta análise, o modelo unitário equivalente para uma estrutura de modo único é dada por um sistema massa-mola-amortecedor simples com um acoplamento electromecânico descrito pela equação 4.2:

$$\begin{cases} M\ddot{u} + C\dot{u} + K_E u = F - \alpha V \\ I = \alpha \dot{u} - C_0 \dot{V} \end{cases} \quad (4.2)$$

Sendo M a massa dinâmica em Kg, C o coeficiente de amortecimento estrutural, K_E a rigidez do colector no curto-circuito, α o factor de força. E que pode ser observado na Fig.4.2:

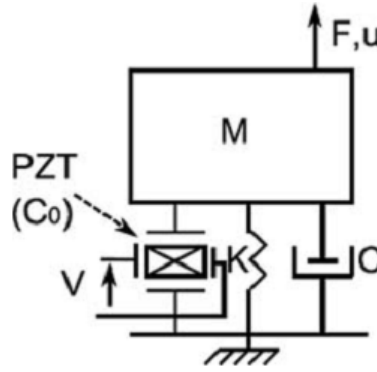


Figura 4.2 – Modelo encastrado para uma estrutura de instrumentos (Priya e Inman, 2009)

Sendo u o deslocamento da flexão, F a força aplicada, V a tensão piezoelétrica e I a corrente que percorre a célula piezoelétrica.

O sistema apresenta um grau de liberdade mecânico (u) e um grau de liberdade eléctrico (V). O coeficiente de acoplamento electromecânico k pode ser também expresso em função dos parâmetros do modelo, obtendo-se a equação 4.3:

$$k = \sqrt{\frac{\alpha^2}{C_0 K_E + \alpha^2}} \quad (4.3)$$

É importante observar que representa o comportamento simples da estrutura electromecânica em torno da ressonância. Sendo suficiente para:

- Controlo de Vibrações, em que apenas as forças que conduzem o sistema a uma das suas frequências de ressonância leva a um deslocamento significativo.
- Colheita de Energia, a grande maioria da energia que pode ser colhida está concentrada nas bandas das frequências de ressonância.

4.3 Técnicas Não-Lineares

Geradores Eléctricos Piezoeléctricos (GEP) são normalmente usados para alimentar circuitos electrónicos de baixo consumo (desde alguns microwatts até algumas centenas de miliwatts) tal requer uma fonte DC de alimentação, obtida da rectificação e filtragem da tensão AC fornecida pela célula piezoeléctrica. Um conversor DC-DC é por vezes colocado entre o condensador de filtragem e o circuito que é alimentado. Este conversor pode ser usado como um adaptador de impedância para otimizar a energia transferida ou como regulador de tensão eléctrica.

4.3.1 Princípios

O modo mais simples de colher energia consiste em ligar o circuito eléctrico a ser alimentado directamente na célula piezoeléctrica através de uma ponte rectificadora de onda completa seguida de um condensador de filtragem C_R , tal como mostra a Fig.4.3a:

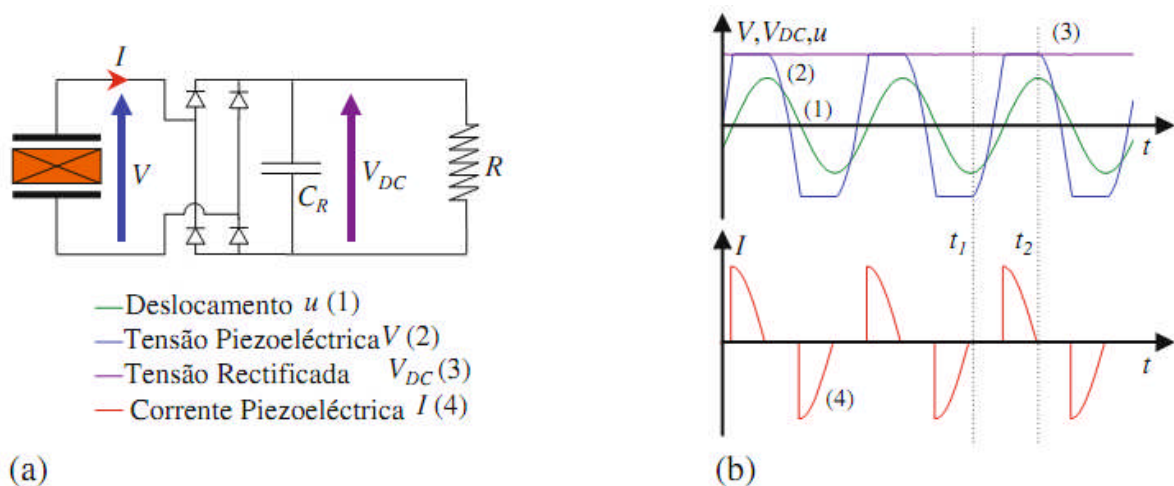


Figura 4.3 – Técnica DC standard: a) Esquema eléctrico, b) Formas de onda (Priya e Inman, 2009)

A tensão eléctrica na resistência de carga R é contínua. Quando a tensão piezoeléctrica V é menor em módulo que a tensão eléctrica rectificada V_{DC} , a ponte rectificadora é bloqueada. A corrente I de saída da célula piezoeléctrica é portanto nula uma vez que a tensão eléctrica varia proporcionalmente com a extensão. Quando o módulo da tensão eléctrica V iguala V_{DC} , a ponte conduz, o que interrompe a mudança V . A ponte pára de conduzir quando o módulo do deslocamento u diminui. Os sinais referidos são apresentados na Fig.4.3.b.

4.3.2.1 Técnica SSHI

A técnica de colheita síncrona de comutação numa bobine em paralelo está esquematizada na Fig.4.4a:

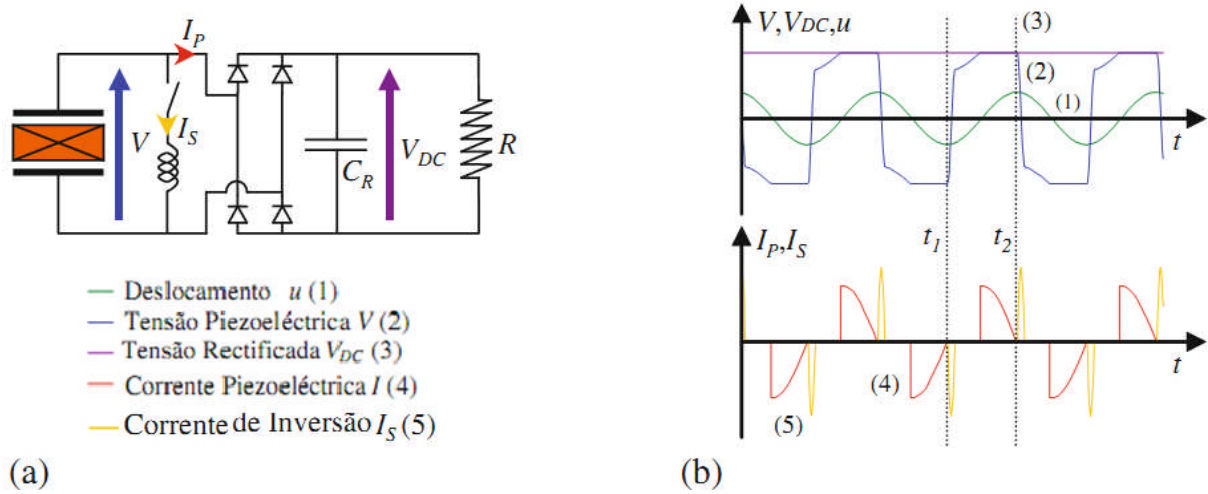


Figura 4.4 – Técnica SSHI DC: a) Dispositivo, b) Formas de onda (Priya e Inman, 2009)

Enquanto a tensão piezoelétrica V for menor em valor absoluto que a tensão rectificada V_{DC} , a corrente I_P na ponte rectificadora é nula, e a tensão varia proporcionalmente com o deslocamento da viga. Quando o valor absoluto de V iguala V_{DC} , a ponte conduz, e V fica constante. A ponte rectificadora deixa de conduzir quando o deslocamento atinge o seu máximo, o que coincide com o começo da inversão da tensão na bobine L_I . A corrente I_P é absorvida pela ponte, correspondendo portanto a uma libertação da corrente I_S na bobine de inversão do sinal. As formas de onda correspondentes estão na Fig.4.4b.

4.3.2.2 Desenvolvimento Teórico

Considerando um intervalo de tempo $[t_1, t_2]$ como na Fig.4.4b. t_1 e t_2 correspondem a duas inversões consecutivas de sinal. t_1 é o instante anterior à primeira inversão de sinal e t_2 o instante anterior à segunda. A carga eléctrica extraída das células piezoeléctricas entre estes dois instantes é a soma durante este meio período das cargas eléctricas na resistência R e no circuito de comutação, dada por:

$$I = \frac{\partial q}{\partial t} \Rightarrow q = \int_{t_1}^{t_2} I dt = \frac{V_{DC}}{R} \frac{T}{2} + \int_{t_1}^{t_2} I_s dt \quad (4.4)$$

A corrente no circuito de comutação é sempre nula, excepto na fase de inversão imediatamente após t_1 , em que está directamente ligada à derivação da tensão piezoeléctrica V . A carga eléctrica no circuito de comutação é dada por:

$$q = \int_{t_1}^{t_2} I_s dt = -C_0 \int_{t_1}^{t_1 + T} dV = -C_0 V_{DC} (1 + \gamma) \quad (4.5)$$

Substituindo a equação 4.5 em 4.4 e considerando a equação eléctrica constitutiva 4.2, a tensão rectificada V_{DC} pode ser dada em função da amplitude do deslocamento, da carga resistiva, e dos parâmetros α e C_0 do modelo. Desta forma obtém-se:

$$V_{DC} = \frac{2R\alpha}{RC_0(1-\gamma)\omega + \pi} \omega u_M \quad (4.6)$$

A potência obtida da colheita é dada por:

$$P = \frac{V_{DC}^2}{R} = \frac{4R\alpha^2}{(RC_0\omega(1-\gamma)\omega + \pi)^2} \omega^2 u_M^2 \quad (4.7)$$

Sendo máxima P_{\max} para uma resistência de carga óptima R_{opt} :

$$R_{opt} = \frac{\pi}{C_0(1-\gamma)\omega} \leq \frac{\pi}{C_0\omega} = \frac{1}{2C_0f} = \pi Z_{in} \cong 3Z_{in} \quad \text{e} \quad P_{\max} = \frac{\alpha^2}{\pi C_0(1-\gamma)} \omega u_M^2 \quad (4.8)$$

A máxima potência colhida pode ser expressa como função da energia potencial elástica máxima na estrutura e do coeficiente de acoplamento, como:

$$P_{\max} = \frac{k^2}{1-k^2} \frac{2E_e}{\pi(1-\gamma)} \omega \quad (4.9)$$

Sendo a Energia Potencial Elástica da estrutura dada por:

$$E_e = \frac{1}{2} K_E u_M^2 \quad (4.10)$$

A razão de máxima potência com a técnica SSHI à máxima potência é $2/(1-\gamma)$.

O ciclo de energia que corresponde à energia transferida E_{Topt} na situação em que o gerador piezoelétrico fornece a resistência R_{opt} está na Fig.4.5:

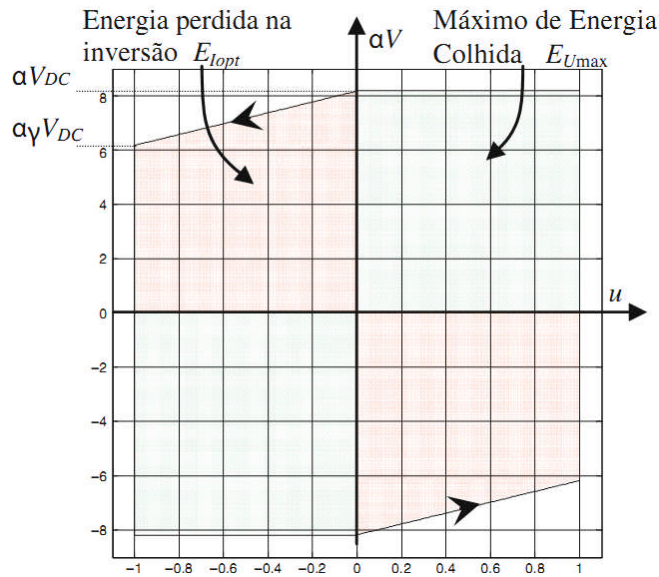


Figura 4.5 – Ciclos Normalizados de Energia (Priya e Inman, 2009)

Neste caso, a tensão rectificada é dada segundo:

$$V_{DCopt} = \frac{\alpha}{C_0(1-\gamma)} u_M \quad (4.11)$$

O máximo de Energia Consumida $E_{U_{\max}}$ pela resistência R_{opt} durante um período é dada por:

$$E_{U \max} = \frac{2\alpha^2}{C_0(1-\gamma)} u_M^2 = 2\alpha u_M V_{DC} \quad (4.12)$$

E a Energia Dissipada E_{lopt} no circuito de comutação:

$$E_{lopt} = C_0 V_{DC}^2 (1-\gamma^2) = \alpha u_M V_{DC} (1+\gamma) \quad (4.13)$$

A Energia óptima Transferida (E_{Topt}) é dada por:

$$E_{Topt} = E_{lopt} + E_{U \max} = \frac{\alpha^2}{C_0} \frac{3+\gamma}{1-\gamma} u_M^2 = \frac{k^2}{1-k^2} \frac{2E_e(3+\gamma)}{1-\gamma} \quad (4.14)$$

A estrutura excitada na sua frequência de ressonância por uma força F que varia temporalmente segundo uma sinusóide. A energia fornecida à estrutura pela força de excitação F é dada por:

$$P_F = \frac{C\omega^2 u_M^2}{2} \quad (4.15)$$

O rendimento do gerador piezoeléctrico é igual à energia dissipada na resistência sobre a potência fornecida:

$$\eta = \frac{8R\alpha^2}{C(RC_0(1-\gamma)\omega + \pi)^2} \quad (4.16)$$

O rendimento é máximo η_{\max} para a resistência R_{opt} , em função do coeficiente do acoplamento da estrutura, do factor mecânico de qualidade e do coeficiente eléctrico de inversão com:

$$\eta_{\max} = \frac{2\alpha^2}{\pi C C_0 (1-\gamma) \omega} = \frac{2k^2 Q_m}{\pi (1-\gamma)} \quad (4.17)$$

4.3.3.1 Técnica SECE

Um dispositivo capaz de extrair a energia electrostática de células piezoelétricas num curto intervalo de tempo que implementa a técnica de extracção síncrona de carga eléctrica SECE (*Synchronous Electric Charge Extraction*) tal como mostra a Fig.4.6a:

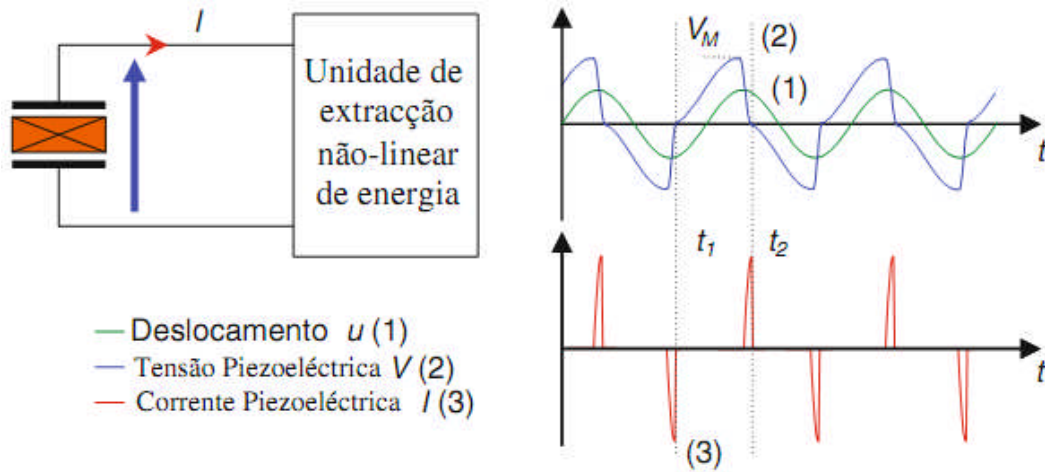


Figura 4.6 – Técnica SECE: a) Dispositivo, b) Formas de onda (Priya e Inman, 2009)

A energia electrostática na célula piezoelétrica é extraída em cada extremo do deslocamento, trazendo a tensão eléctrica da célula piezoelétrica de volta para zero. As respectivas formas de onda associadas estão na Fig.4.6b. A passagem da tensão de negativa a positiva entre os instantes t_1 e t_2 , sendo V_M o valor máximo da tensão na célula.

4.3.3.2 Desenvolvimentos Teóricos

Considera-se a estrutura em movimento sinusoidal com amplitude constante de u_M . A relação que descreve a evolução da tensão eléctrica entre dois instantes da mudança de sinal mantém-se válida, contudo a tensão nula leva a uma energia colhida dada pela equação:

$$E_U = \frac{1}{2} C_0 V_M^2 \quad (4.18)$$

De onde resulta a expressão da potência:

$$P = \frac{2\alpha^2}{\pi C_0} \omega u_M^2 \quad (4.19)$$

que corresponde à expressão da potência colhida em função da amplitude do deslocamento e dos parâmetros α e C_0 do modelo.

A potência P pode ser igualmente expressa como função do coeficiente de acoplamento e da energia elástica máxima da célula:

$$P = \frac{k^2}{1-k^2} \frac{4E_e}{\pi} \omega \quad (4.20)$$

A potência extraída com técnicas SECE não é função da impedância de entrada do dispositivo a ser alimentado, pois pressupõe-se que a tensão não é função da carga eléctrica mas apenas da quantidade de energia extraída antes de cada processo de extracção.

A energia óptima transferida durante um período quando o gerador piezoeléctrico alimenta a resistência R_{opt} e a razão da energia colhida da energia transferida, dada por:

$$E_{T_{opt}} = \frac{4\alpha^2}{C_0} u_M^2 = \frac{8k^2}{1-k^2} E_e \quad (4.21)$$

O rendimento do gerador piezoeléctrico com a implementação do SECE é dada por:

$$\eta = \frac{4\alpha^2}{\pi C C_0 \omega} = \frac{4k^2 Q_m}{\pi} \quad (4.22)$$

4.3.4 Implementação da Técnica SECE

Uma configuração possível do circuito de extracção de carga pode ser:

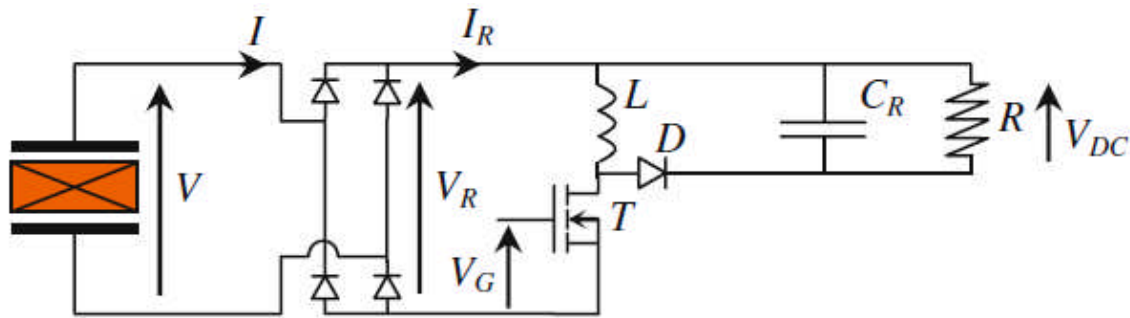


Figura 4.7 – Circuito da técnica SECE (Priya e Inman, 2009)

Este circuito é composto por uma ponte rectificadora e um conversor DC-DC buck-boost. A carga eléctrica é representada pela resistência R .

O conversor é controlado pela tensão da gate V_G do transístor T MOSFET. Esta tensão é determinada pelo circuito de controlo que detecta os máximos e passagens no zero da tensão rectificada V_R . Quando a tensão V_R atinge o máximo, uma tensão é aplicada na gate do transístor. O transístor está então à condução e permite a transferência para a bobine L da energia electrostática da célula piezoeléctrica. Quando todas as cargas eléctricas presentes nos eléctrodos das células piezoeléctricas forem extraídas, o circuito de controlo detecta o cancelamento da tensão rectificada V_R e aplica uma tensão nula sobre a gate do transístor. Esta operação bloqueia o transístor e as células piezoeléctricas ficam novamente em circuito aberto durante alguns milisegundos, onde a extracção da carga dura alguns μs . Em teoria o conversor ideal tem um rendimento unitário e a potência de saída é portanto igual à de entrada e não uma função da resistência de carga R . Tal significa que a tensão de saída V_{DC} do conversor DC-DC é determinada apenas pela resistência R . Na prática, o rendimento do conversor não é perfeita sendo função da resistência. A potência e resistências são normalizadas como anteriormente. A potência à entrada do conversor corresponde igualmente à potência extraída da célula piezoeléctrica.

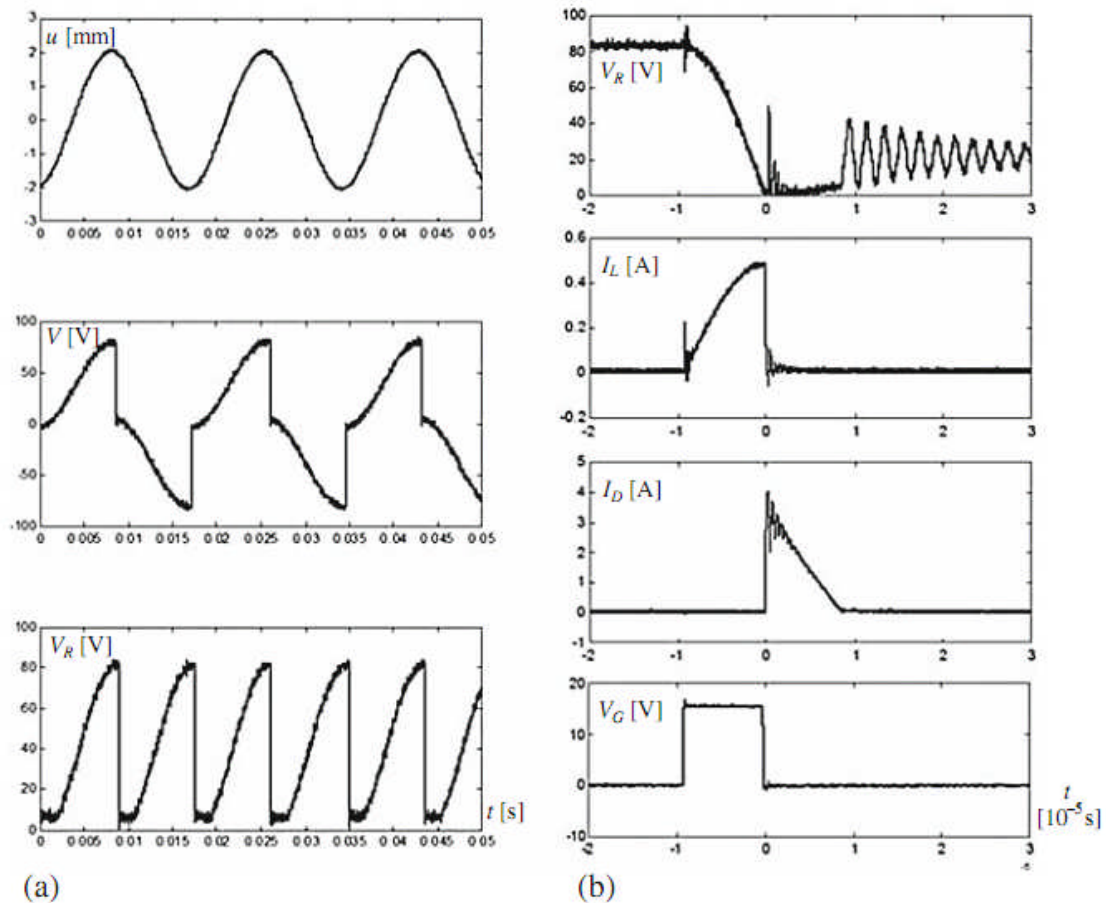


Figura 4.8 – Sinóptico característico da técnica SECE:

a) Vibração de amplitude constante, b) Na frequência de ressonância (Priya e Inman, 2009)

O modelo do dispositivo SECE necessita de um conversor DC-DC para alimentar a carga, de modo a adaptar o nível da tensão e/ou impedância entre o gerador piezoelétrico e a carga. Adicionalmente, quanto maior for a tensão entregue pelo gerador piezoelétrico, menor será o rendimento do conversor destinado a reduzir a tensão para um nível indicado para alimentar um circuito electrónico típico.

4.4 Conclusões

O valor de carga óptimo para o qual a potência é máxima é aproximadamente o triplo da impedância da fonte piezoelétrica a uma dada frequência de oscilação.

As técnicas SSHI DC e SECE são interfaces electrónicas de interesse uma vez que tal como os respectivos gráficos da tensão indicam ocorre um aumento da área ao qual corresponde um aumento de potência e consequentemente da energia extraída.

Estas técnicas não-lineares permitem vencer o efeito do acoplamento electromecânico do material piezoelétrico, tornando a energia extraída independente da impedância de carga e tensão dimensionados como óptimos.

5. Resultados Experimentais

5.1 Tipologia de aproveitamento

Foi criado em laboratório um dispositivo de colheita de energia em viga encastrada com excitação na extremidade oposta à do encastramento. Sobre a superfície da viga foi aplicada uma célula piezoelétrica sensível às deformações.

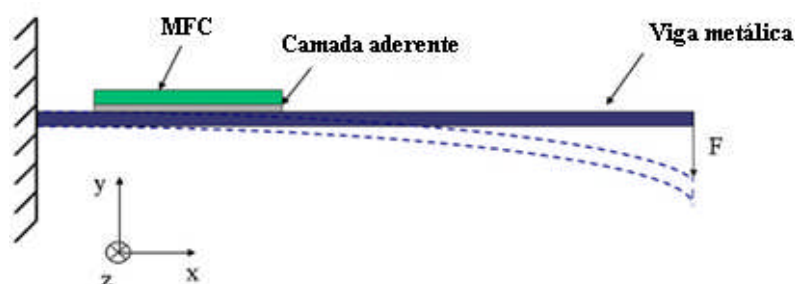


Figura 5.1 – Esquema do dispositivo de colheita

As características da excitação são definidas com uma máquina de vibrações que permite regular a frequência e a amplitude de oscilação da estrutura.



Figura 5.2 – Dispositivo de colheita de energia

A tecnologia usada para a célula piezoelétrica foi MFC do tipo P2 indicada para movimentos de contração lateral, sendo simultaneamente um actuador e sensor de efeito d_{31} , ou seja, com a direcção de polarização perpendicular à direcção da extensão.



Figura 5.3 – Célula MFC modelo M-8528-P2 (Smart Material, 2010)

Tabela 5.1 – Informações do fabricante dos modelos disponíveis (Smart Material, 2010)

Dispositivo MFC	Tensão de Operação		Capacidade	Características como Sensor		Características como Actuador	Características como Gerador
	V_{op}^+ [V]	V_{op}^- [V]		d_{33}^{eff} [pC/N]	d_{31}^{eff} [pC/N]	Extensão/ Volt [$\mu m/V$]	Carga/Extensão [pC/ppm]
P1	1500	-500	0,42	460	-	0,7 .. 0,9 [0...1500 V]	1670 [> 100 V]
P2	360	-60	4,5	-	-370	-2 [0...360 V]	3250 [< 100 V]

Tabela 5.2 – Informações do fabricante para os modelos usados (Smart Material, 2010)

Modelo	Comprimento p/ Colheita (mm)	Largura p/ Colheita (mm)	Comprimento Absoluto (mm)	Largura Absoluta (mm)	Capacidade (nF)
M-2814-P2	28	14	36	16	25,7
M-8528-P2	85	28	106	34	172,0

A primeira estrutura suporte consiste numa viga de metal zincado (com 2 mm de espessura) com pontos de encastramento nas extremidades e pontos intermédios de excitação. Esta configuração permite a análise dos modos de vibração da estrutura no sentido de maximizar a amplitude de oscilação na zona da célula, e consequentemente a potência eléctrica extraída.

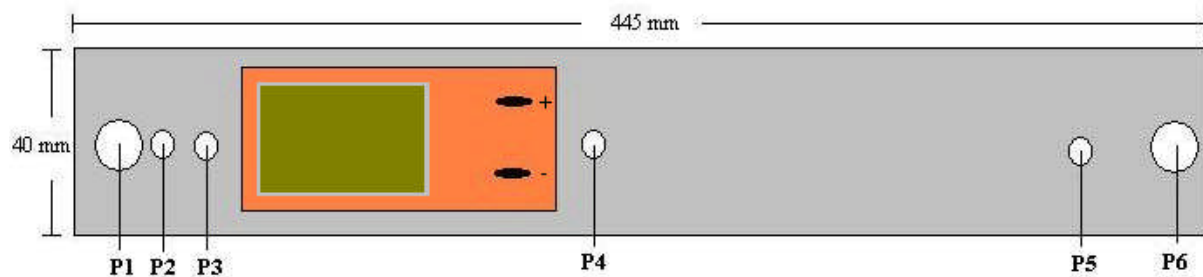


Figura 5.4 – Dispositivo de colheita: Viga 1

Legenda:

P1 – Ponto de encastramento (22 mm), P2 – Ponto de excitação (58 mm), P3 – Ponto de excitação (81 mm), P4 – Ponto de excitação (228 mm), P5 – Ponto de excitação (363 mm), P6 – Ponto de encastramento (430 mm)

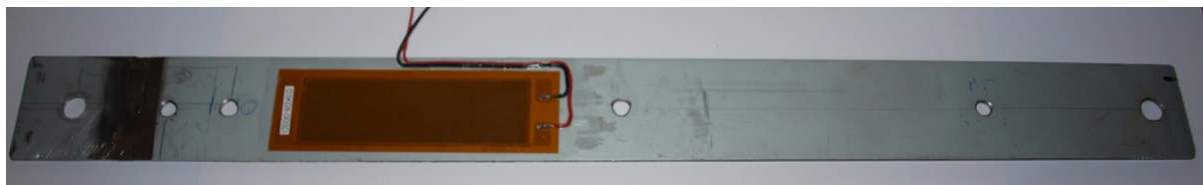
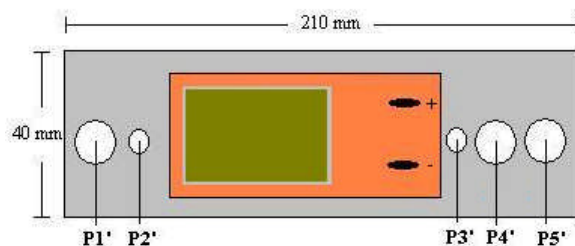


Figura 5.5 – Viga 1 com célula piezoelétrica M-8528-P2



Legenda:

P1' – Ponto de encastramento (13 mm)
P2' – Ponto de excitação (53 mm)
P3' – Ponto de excitação (122 mm)
P4' – Ponto de encastramento (162 mm)
P5' – Ponto de encastramento (183 mm)

Figura 5.6 – Dispositivo de colheita: Viga 2

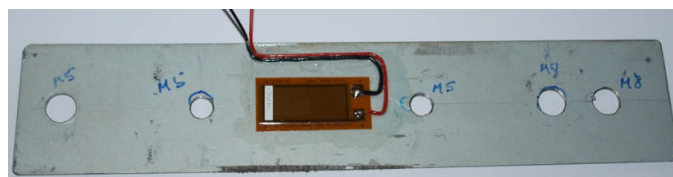


Figura 5.7 – Viga 2 com célula piezoelétrica M-2814-P2

5.2 Estudo das ressonâncias da estrutura

5.2.1 Introdução

Fixou-se a Viga 1 no ponto P1 de encastramento a uma estrutura estável e promoveu-se o movimento de vibração nos pontos de excitação com uma máquina de vibrações (shaker).

Colocou-se a viga a vibrar em torno das frequências de ressonância (na gama entre 0 e 100 Hz) e observou-se no osciloscópio (Tecktronics [47-440 Hz / 100-240 V] de 4 entradas) os valores eficazes da tensão medida.

5.2.2 Resultados

Registaram-se os valores de tensão AC medidos nos eléctrodos da célula em 5 modos de ressonância da estrutura suporte previamente determinados. Com os valores medidos calcularam-se os valores teóricos de tensão, de corrente e de potência que se obteriam com a rectificação do sinal medido.

Tabela 5.3 – Dados obtidos e valores calculados*

Modo (i)	Frequência (Hz)	Tensão AC pico-a-pico (V)	Tensão DC (V)	Potência DC (mW)	Corrente DC (μA)
1	6,86	75	37,5	1,406	37,5
2	17,8	20	10	0,1	10
3	32	35	17,5	0,306	17,5
4	41,85	50	25	0,625	25
5	107,22	20	10	0,1	10

*osciloscópio com impedância de 1 MΩ, todos os valores DC foram calculados.

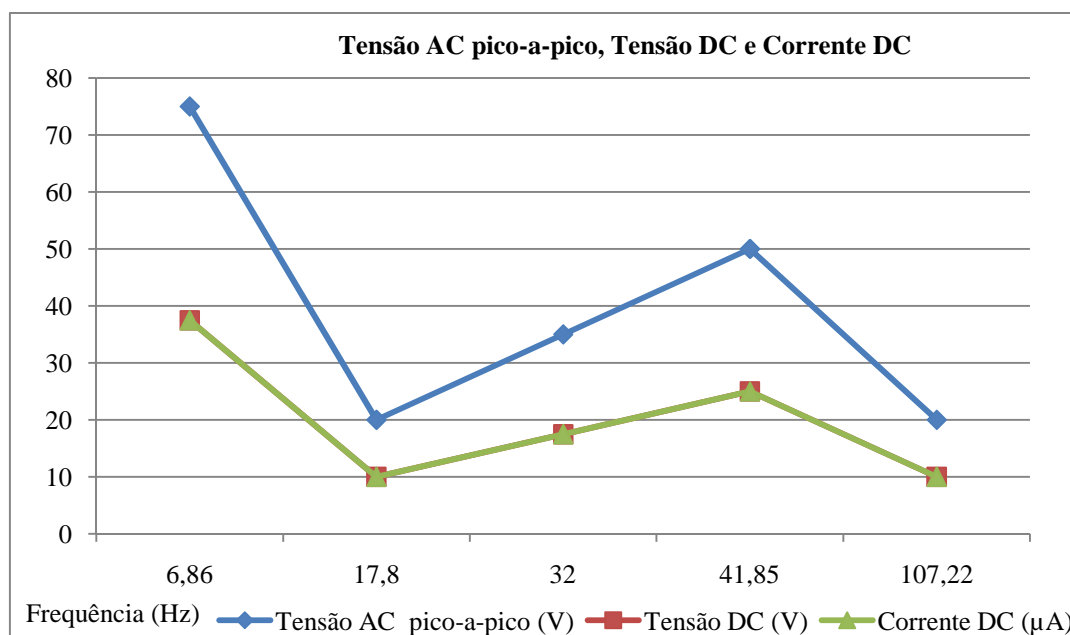


Figura 5.8 – Gráfico da tensão alternada, tensão contínua e corrente contínua

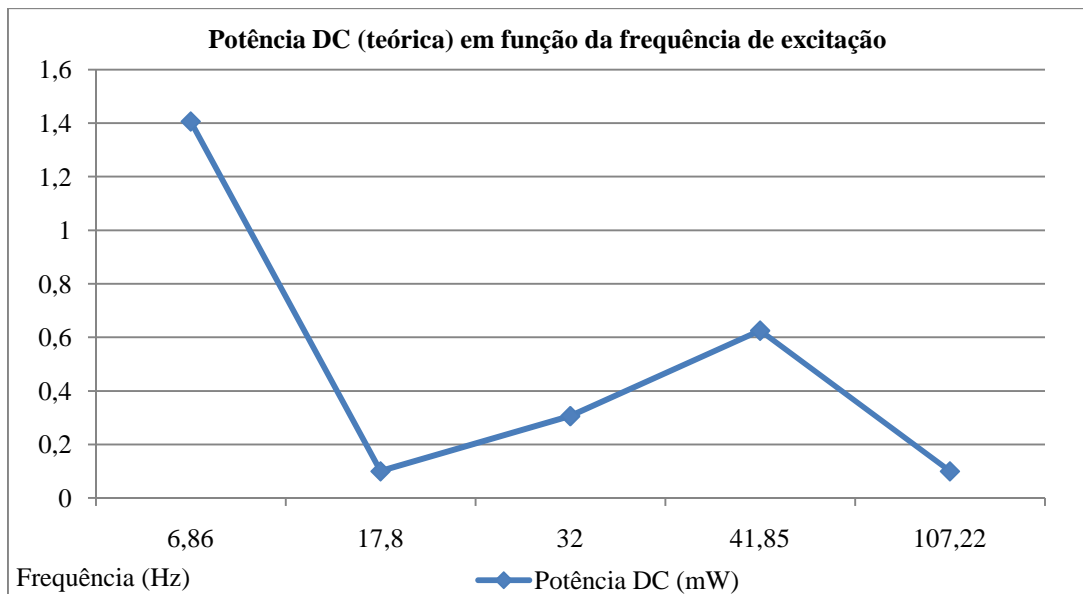


Figura 5.9 – Gráfico da Potência DC (teórica) em cada frequência de ressonância

5.2.3 Conclusões

Por observação do comportamento da viga e com os dados recolhidos pode-se afirmar que:

Na ressonância a viga apresenta maior amplitude de oscilação.

A amplitude de oscilação da viga é inversamente proporcional à sua frequência, o que resulta numa maior extensão da célula.

A tensão de saída do circuito é tanto maior quanto maior for a amplitude de oscilação da viga, portanto existe uma relação de proporcionalidade entre a tensão e a amplitude de oscilação sendo maximizada em torno dos valores de ressonância natural da estrutura.

5.3 Rectificação e Filtragem

5.3.1 Introdução

Para a rectificação da tensão alternada sinusoidal piezoelétrica obtida nos eléctrodos da célula é necessário um circuito rectificador de onda completa. O circuito e os sinais de corrente e tensão presentes são:

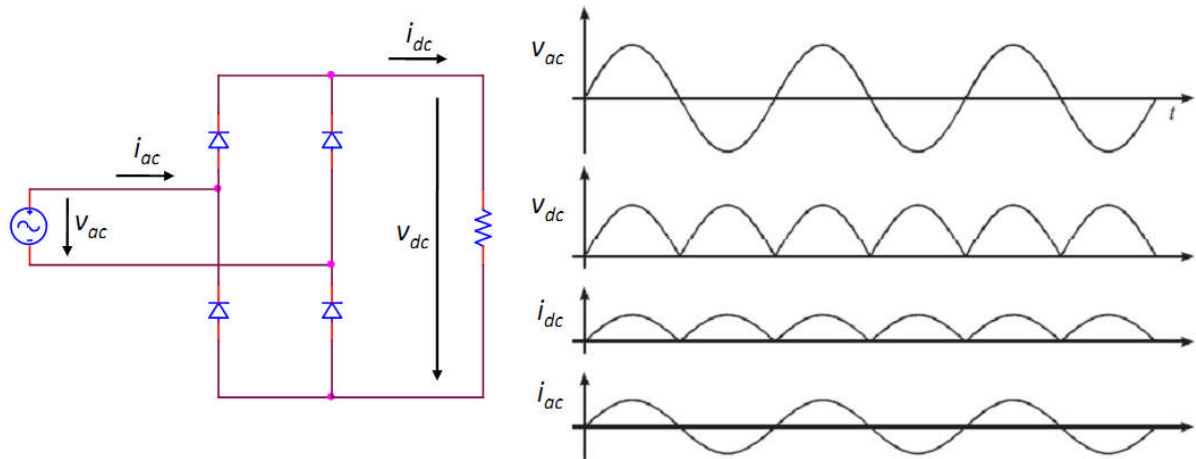


Figura 5.10 – Circuito e Sinóptico de Rectificador em Ponte com Díodos

$$\text{Tensão Piezoelétrica: } V_{AC}(t) = V_m \sin(\omega t) \quad (5.1)$$

$$\text{Valor Médio da Tensão Rectificada: } \langle V_{DC} \rangle_{\text{médio}} = \frac{2V_m}{\pi} \quad (5.2)$$

Devido à característica unidireccional dos díodos no rectificador, a tensão DC obtida apresenta uma componente AC (ripple ou ondulação) que pode ser alisada colocando um condensador em paralelo com a ponte. O circuito e os sinais de corrente e tensão presentes são:

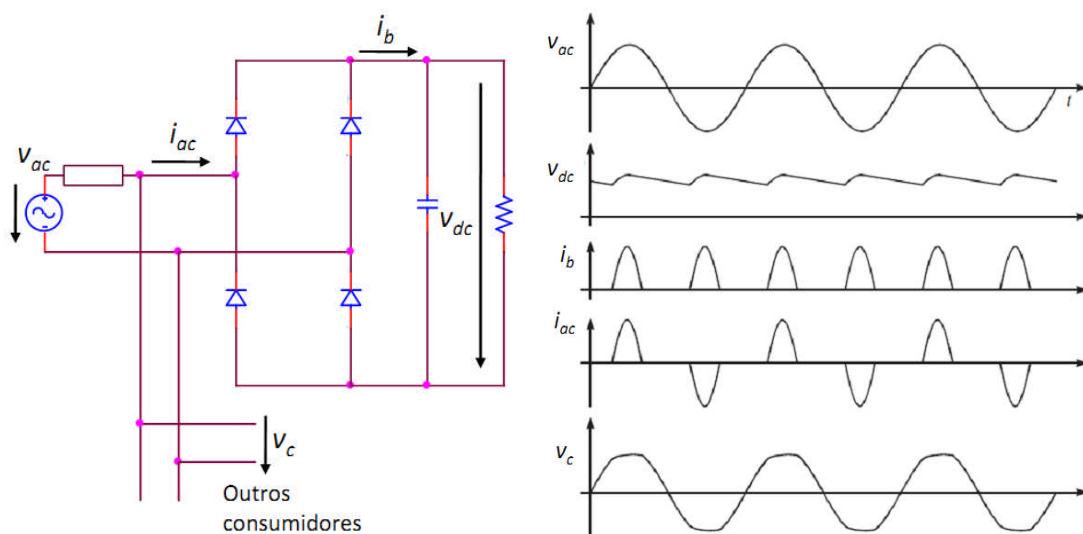


Figura 5.11 – Circuito e Sinóptico de Rectificador com Filtragem

Na escolha das componentes do circuito teve-se em conta as especificações de tensão de funcionamento da célula indicadas pelo fabricante e ainda a frequência de excitação.

Inicialmente, o circuito rectificador foi implementado com díodos Shotky que suportam tensões até aos 20 V, contudo estes foram destruídos pelos valores de tensão obtidos.

Para suportar as tensões anteriormente medidas foram usados díodos de potência 4007 que suportam até 1000 V, operando a frequências de até 50 Hz. Contudo, a partir deste valor os díodos deixam de rectificar a tensão.

Dadas as especificações das células piezoeléctricas usadas (podem operar até 360 V) e as frequências de trabalho, a solução encontrada foi a utilização de díodos Philips BYV26 B que operam a alta frequência e conduzem até 400 V, apresentando ainda um baixo consumo de corrente.

Para filtragem da tensão usaram-se condensadores Philips de 35 V e 650 μF de capacidade. Contudo, considerando os níveis de tensão e frequências de trabalho (a frequência de carregamento é inversamente proporcional à capacidade do condensador) este condensador saturou rapidamente destruindo-se a partir de certos valores de tensão.

Dadas as especificações das células piezoeléctricas usadas (podem operar até 360 V) e as frequências de trabalho, a solução encontrada foi a utilização de condensadores Lenon de 450 V e 10 μF de capacidade e um resistor cerâmico (baixo consumo) de 100 Ω em paralelo com este. Para o efeito foi soldado numa placa de cobre um circuito rectificador:

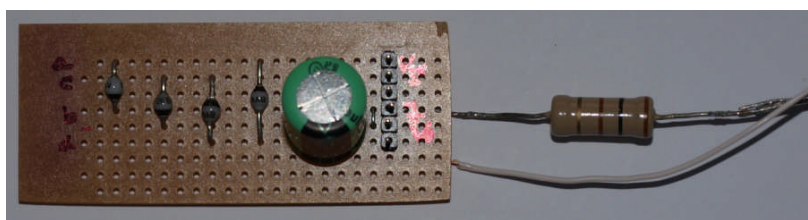


Figura 5.12 – Montagem rectificadora com filtragem

Para simular o consumo de um aparelho electrónico foi usada uma carga regulável EL 9000 A (2400 W). Esta carga pode ser programada ao nível da tensão, corrente ou resistência consumindo a energia gerada pelo circuito de colheita.

Colocaram-se ambas as vigas a vibrar a várias frequências registando-se a tensão rectificada, a corrente contínua e a amplitude de oscilação da viga na zona da célula piezoeléctrica.

5.3.2 Resultados

Colocou-se a Viga 1 com encastramento em P1 e excitação nos pontos P4 e P5, com frequências até aos 200 Hz (frequência limite para leitura do valor da amplitude de oscilação da viga), com a carga regulada em tensão para 20 V. Os resultados obtidos foram:

Tabela 5.4 – Dados medidos em laboratório (Carga regulada para 20 V)

	Frequência (Hz)	Tensão DC (V)	Corrente DC (μ A)	Potência DC (mW)	ΔX (mm)
Viga 1	Encastramento: P1 / Excitação: P5				
	2	4	10	0,04	5
	5	6	15	0,09	3
	10	7	20	0,14	5
	20,23	8	25	0,2	7
	20,71	4	20	0,08	5
	30	4	20	0,08	6
	40	2	20	0,04	5
	50	21	40	0,84	10
	52,11	12	30	0,36	6
	Encastramento: P1 / Excitação: P4				
	52,11	8	20	0,16	3
	100	3	-	-	-
	200	10	30	0,3	1

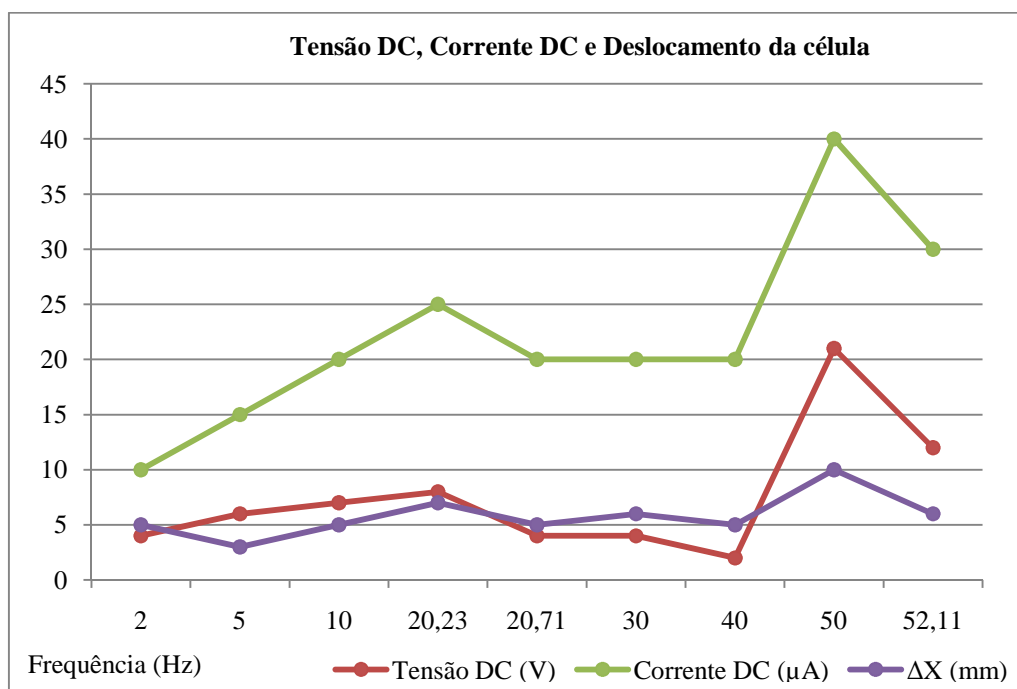


Figura 5.13 – Tensão, corrente e amplitude de oscilação na Viga 1 (Encastramento em P1 e Excitação em P5)

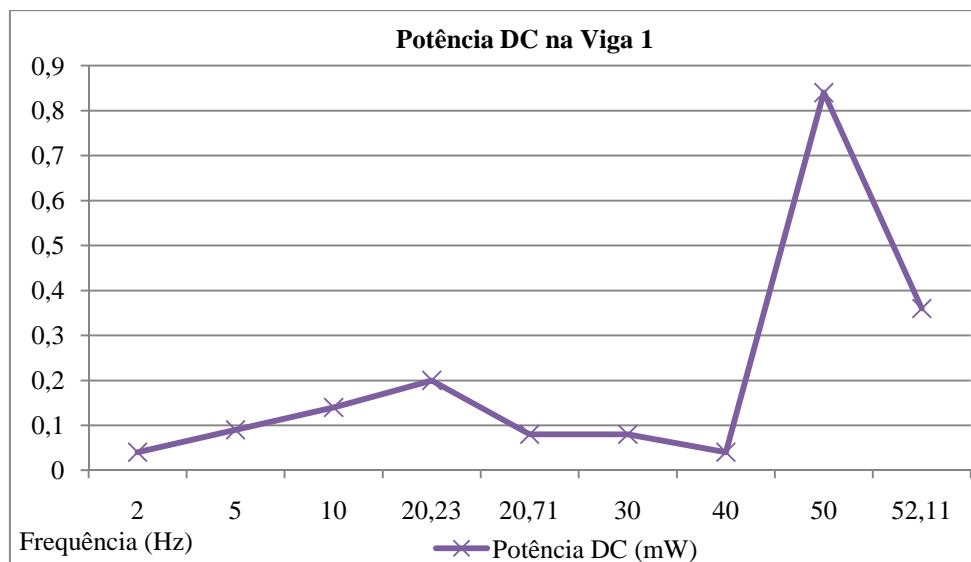


Figura 5.14 – Potência DC calculada para a Viga 1 (Encastramento em P1 e Excitação em P5)

Colocou-se a Viga 2 com encastramento em P1' e excitação nos pontos P4' e P3', frequências entre os 100 Hz e os 20 kHz (frequência a partir da qual deixa de ser possível medir a amplitude de oscilação da viga), com a carga regulada em tensão para 20 V. Os resultados obtidos foram:

Tabela 5.5 – Dados medidos em laboratório (Carga regulada para 20 V)

Viga 2	Frequência (Hz)	Tensão DC (V)	Corrente DC (μA)	Potência DC (mW)	ΔX (mm)
	Encastramento: P1' / Excitação: P4'				
	100	2	10	0,02	-
	200	4	10	0,04	-
	300	4	10	0,04	-
	382	18	40	0,72	0,5
	500	4	-	-	-
	1,0 k	2	5	0,01	-
	1,05 k	4	5	0,02	-
	1,1 k	6	5	0,03	-
	2 k	3	10	0,03	-
	5 k	4	20	0,08	-
	10 k	5	20	0,1	-
	20 k	6	20	0,12	-
	Encastramento: P1' / Excitação: P3'				
	9,7	8	20	0,16	7
	12,31	12	35	0,42	6
	24,94	20	40	0,8	8
	28,33	24	40	0,96	10
	91,4	4	20	0,08	0,25
	191	4	20	0,08	0,25
	381	18	40	0,72	0,5

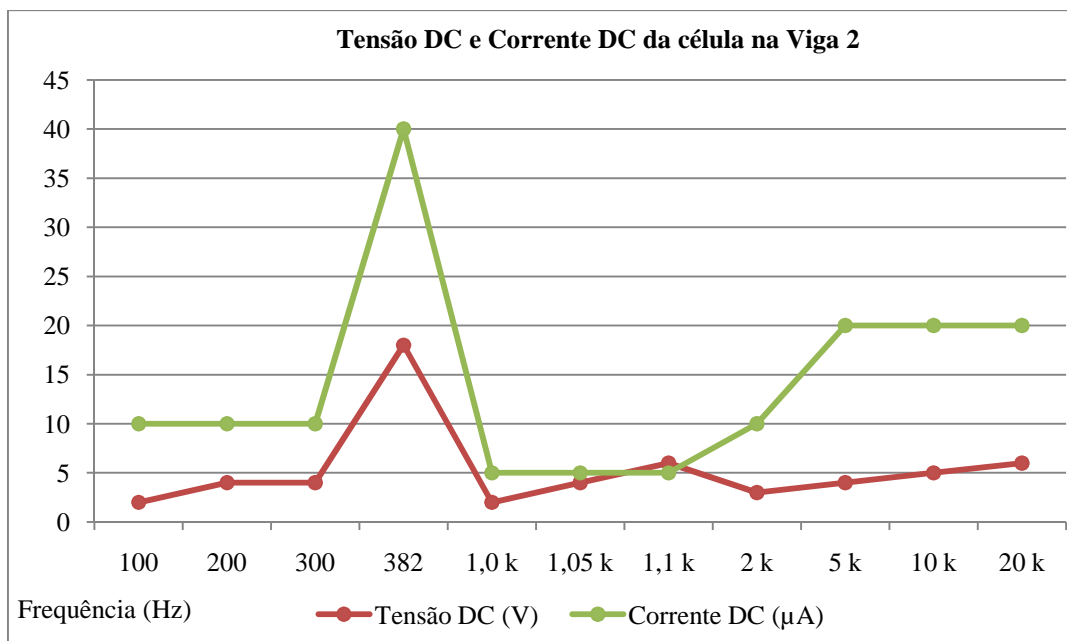


Figura 5.15 – Tensão DC e Corrente DC medidos na Viga 2 (Encastramento em P1' e Excitação em P4')

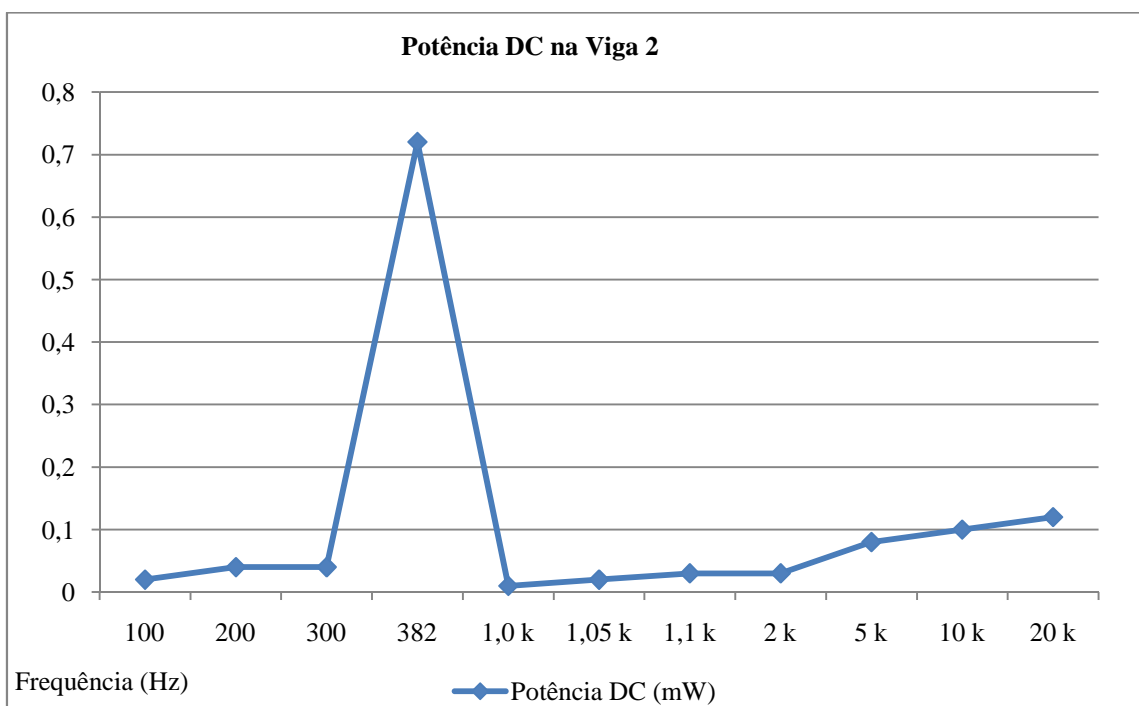


Figura 5.16 – Potência DC calculada para a Viga 2 (Encastramento em P1' e Excitação em P4')

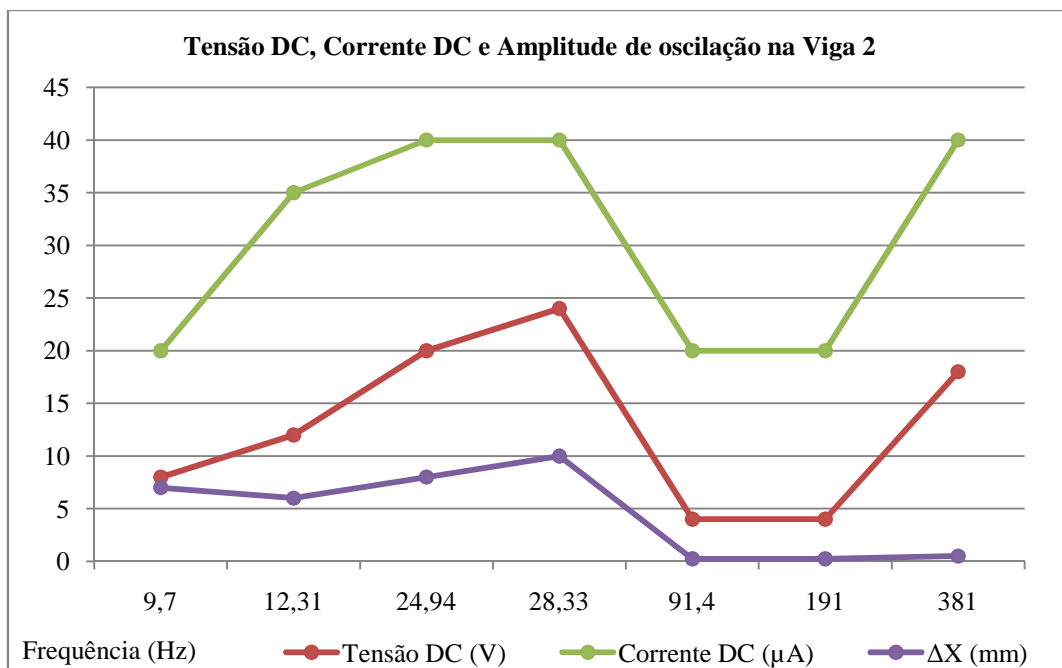


Figura 5.17 – Tensão DC, Corrente DC e amplitude da oscilação medidos na Viga 2 (Encastramento em P1' e Excitação em P3')

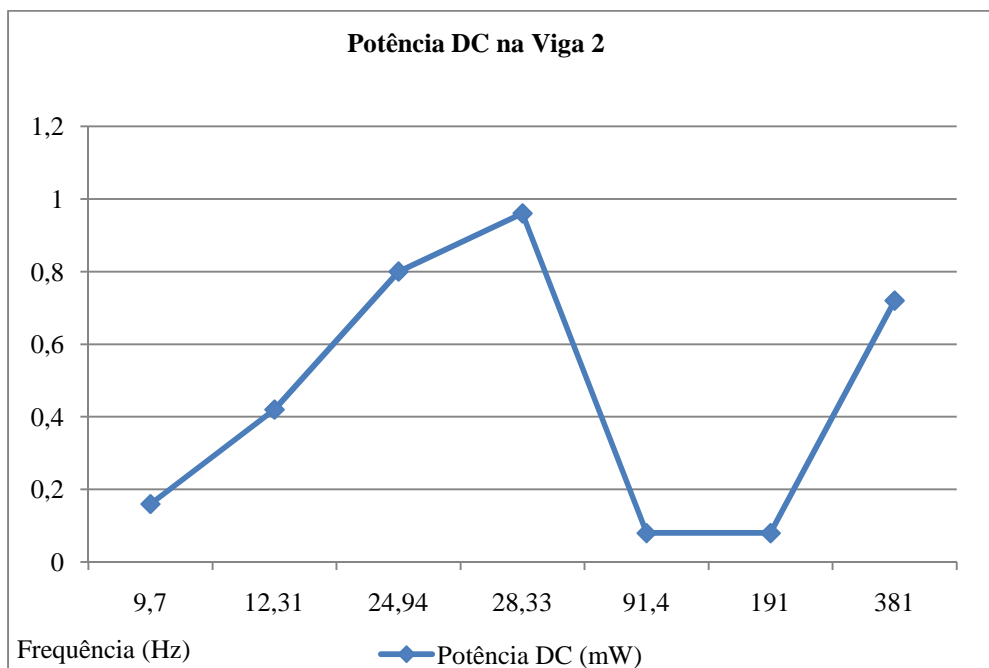


Figura 5.18 – Potência DC calculada para a Viga 2 (Encastramento em P1' e Excitação em P3')

Tabela 5.6 – Dados medidos em laboratório (Carga regulada em tensão e em resistência)

Viga 2	Frequência (Hz)	Tensão DC (V)	Corrente DC (μ A)	Potência DC (mW)	ΔX (mm)
	Carga regulada em tensão (60 V)				
	Encastramento: P1' / Excitação: P3'				
	28,33	23	40	0,92	10
	Carga regulada em resistência (200 Ω)				
	Encastramento: P1' / Excitação: P3'				
	22,38	16	3	0,048	8
	27,8	26	100	2,6	12
	28,33	28	100	2,8	13
	190	4	-	-	-
	382	8	-	-	-

5.3.3 Conclusões

Perto das frequências de ressonância da viga os níveis de tensão são consideravelmente superiores aos restantes valores analisados na gama de frequência.

Para oscilações de alta frequência, menor amplitude da extensão, ocorre uma redução significativa da tensão, da corrente e consequentemente da potência.

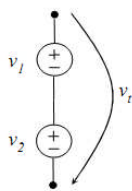
A localização dos pontos de excitação e de encastramento permitem regular a localização do ponto de inflexão ou máxima extensão na viga. Por isso devem ser escolhidos os pontos que maximizam a potência na zona da célula.

5.4 Associação em Série e Paralelo (duas células)

5.4.1 Introdução

Foi estudado a associação de pares de células piezoelétricas segundo uma tipologia com duas células em série e paralelo. Como fontes de energia que são, a associação das células piezoelétricas em série ou em paralelo devem apresentar o comportamento teórico das fontes:

Série:



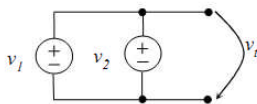
$$v_t = v_1 + v_2$$

Caso geral:

$$v_t = \sum_{i=1}^n v_i$$

A corrente é a mesma em todas as fontes.

Paralelo:

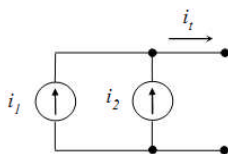


$$v_t = v_1 = v_2$$

Só é possível se as tensões forem iguais.

Utiliza-se para fornecer mais corrente.

Paralelo:



$$i_t = i_1 + i_2$$

Caso geral:

$$i_t = \sum_{i=1}^n i_i$$

A tensão é a mesma em todas as fontes.

Para o efeito adaptou-se a estrutura Viga 1 aplicando-lhe uma célula do mesmo modelo e na mesma posição na face oposta da viga.

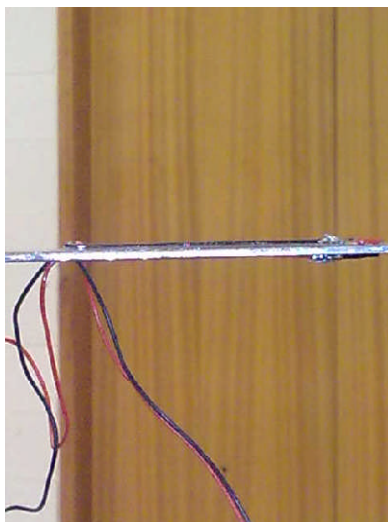


Figura 5.19 – Configuração com duas células da viga oscilante

O tipo de aproveitamento é o mesmo da tipologia com uma célula, tendo sido duplicados os dispositivos electrónicos no sentido de garantir as mesmas condições em cada célula.

Para o efeito foi soldado numa placa de cobre um novo circuito rectificador como mostra a Fig.5.20:

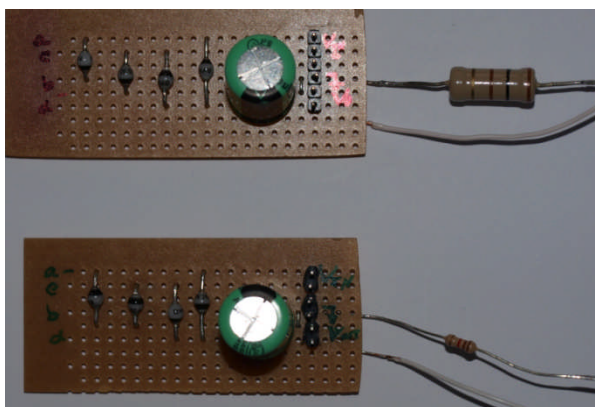


Figura 5.20 – Montagens rectificadoras com condensadores de filtragem

A variação da polaridade dos dois sinais alternados sinusoidais nas mesmas condições pode levar a medições erradas devido à diferença de fases, que pode reduzir os valores quando em atraso ou avanço entre si ou mesmo anularem-se quando em oposição de fase.

Por esta razão a associação em série e paralelo de fontes AC tem que ser feita após a rectificação da tensão de cada célula independentemente, desde que se associem os eléctrodos positivo e negativo das fontes tal como foi apresentado nos esquemas anteriores.

5.4.2 Resultados

Colocou-se a Viga 1 com as duas células piezoelétricas a vibrar a uma das frequências de ressonância da estrutura suporte (modo 3 ou 32 Hz), sendo o encastramento feito no ponto P1 e a excitação promovida no ponto P5.

Registou-se a amplitude do movimento de oscilação da viga e mediu-se a tensão rectificada em cada célula e em seguida a tensão da sua ligação em série.

Para estudar o efeito da associação das células em série mantiveram-se as condições iniciais descritas da excitação repetindo-se o processo para vários valores de carga eléctrica resistiva.

Tabela 5.7 – Dados medidos em laboratório (SÉRIE de duas células)

Carga (Ω)	Célula 1 V_{DC} (V)	Célula 2 V_{DC} (V)	Tensão (V)	Potência (mW)	Condições dos ensaios
98,6	0,6	0,6	0,15	0,23	Viga: 1
196	1	1	0,3	0,46	Ponto de Encastramento: P1
3,9 k	1,7	1,8	3,5	3,14	Ponto de Excitação: P5
5,58 k	1,5	1,5	3	1,61	Frequência de excitação: 31,839 Hz
9,74 k	2,5	2,5	5	2,57	Amplitude de oscilação: $\Delta X = 6$ mm
1,00 M	10	10	20	0,40	Carga: 100 Ω , 200 Ω , 4 k Ω , 6 k Ω , 10 k Ω , 1M Ω e 5 M Ω
5,00 M	15	15	32	0,20	Ganho do Shaker: 3,0 dB

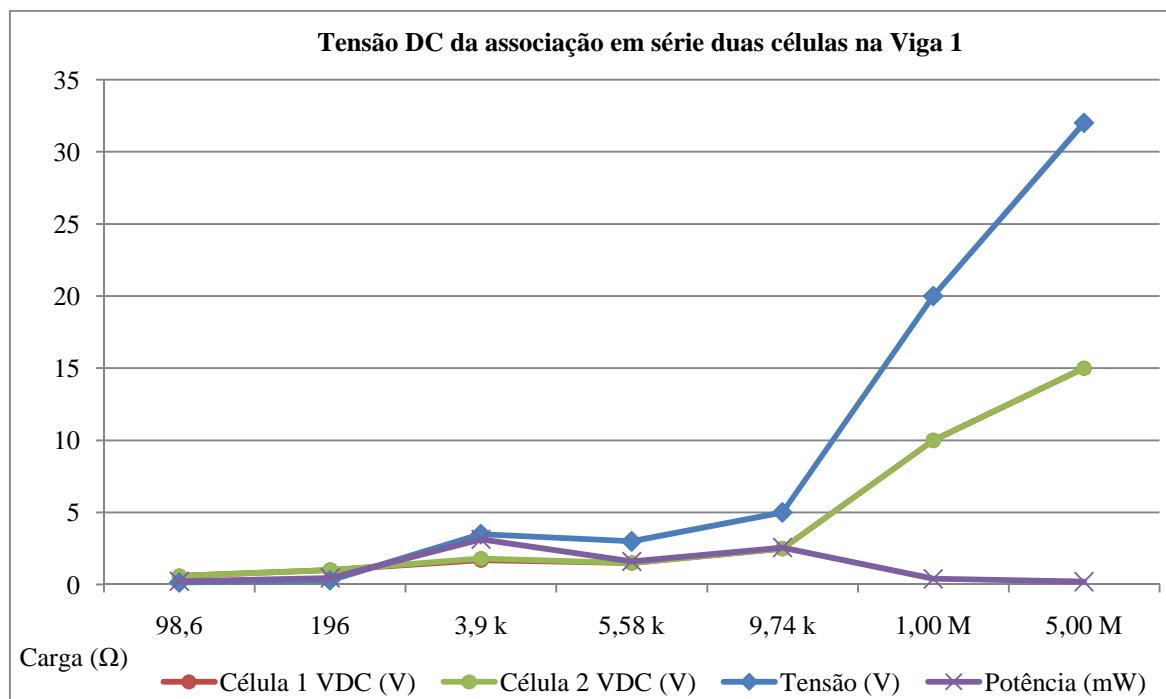


Figura 5.21 – Tensão e potência da série de duas células piezoelétricas

Colocou-se a Viga 1 com as duas células piezoelétricas a vibrar a uma das frequências de ressonância da estrutura suporte (modo 3 ou 32 Hz), sendo o encastramento feito no ponto P1 e a excitação promovida no ponto P5.

Registou-se a amplitude de oscilação da viga e mediu-se a tensão rectificada em cada célula e em seguida a tensão da sua ligação em paralelo.

Para estudar o efeito da associação das células em paralelo mantiveram-se as condições iniciais descritas da excitação repetindo-se o processo para vários valores de carga eléctrica resistiva.

Tabela 5.8 – Dados medidos em laboratório (PARALELO de duas células)

Carga (Ω)	Célula 1 I_{DC} (μA)	Célula 2 I_{DC} (μA)	Corrente (μA)	Potência (μW)	Condições dos ensaios
98,6	502	504	202,8	4	Viga: 1
196	375	350	152,8	5	Ponto de Encastramento: P1
3,9 k	199	192	384,6	577	Ponto de Excitação: P5
5,58 k	162	152	304,7	518	Frequência de excitação: 31,247 Hz
9,74 k	122	121	246,4	591	Amplitude de oscilação: $\Delta X = 6$ mm
1,00 M	5	6	6,0	36	Carga: 100 Ω, 200 Ω, 4 kΩ, 6 kΩ, 10 kΩ, 1 MΩ e 5 MΩ
5,00 M	2	1,8	1,6	13	Ganho do Shaker: 3,0 dB

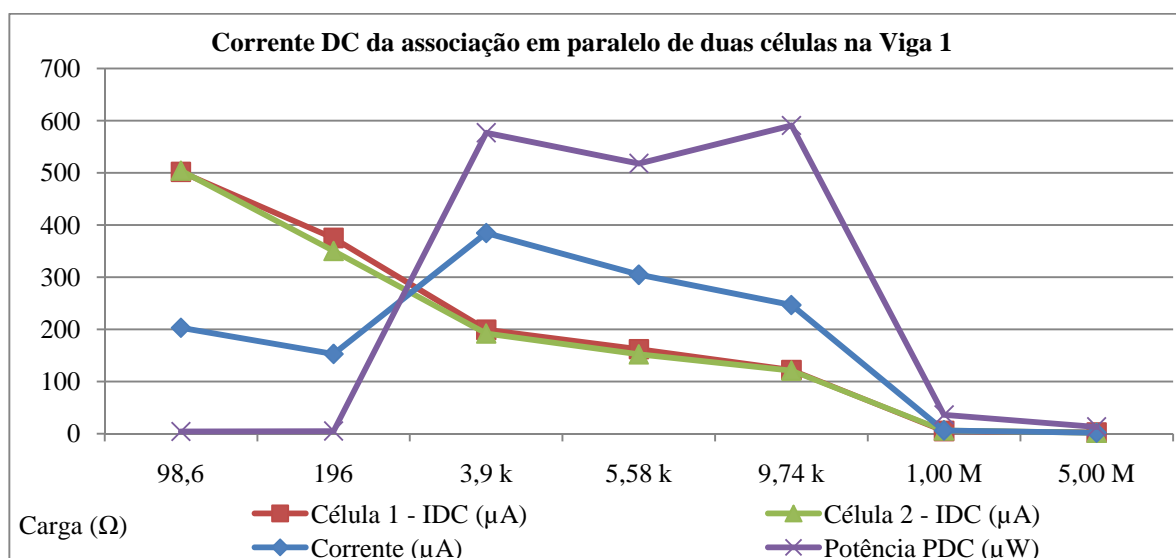


Figura 5.22 – Tensão e potência do paralelo de duas células piezoelétricas

5.4.3 Conclusões

A potência resultante da associação em série (dispositivo com duas células) mostra que a potência aumenta na gama de 4 a 10 k Ω de carga, à medida que se aproxima do valor óptimo 166,23 k Ω (calculado a 32 HZ).

A associação de duas células em série permite duplicar a tensão de cada célula, ou por outro lado, quadruplicar a potência obtida.

Como duas células possuem o dobro da área para captação e se obtém o dobro da tensão a densidade de energia da tecnologia MFC é mantida constante independentemente da área de captação. Portanto, a associação em série é uma boa estratégia para colheita de energia neste tipo de dispositivos.

A potência resultante da associação em série (dispositivo com duas células) mostra que a potência aumenta na gama de 4 a 10 k Ω de carga, à medida que se aproxima do valor óptimo 43,47 k Ω (calculado a 32 HZ).

A associação de duas células em paralelo permite duplicar a corrente de cada célula, ou por outro lado, quadruplicar a potência obtida.

Comparativamente à associação em série as potências obtidas são substancialmente inferiores.

5.5 Compensação com bobine

5.5.1 Introdução

No sentido de compensar o efeito capacitivo das células piezoelétricas colocou-se em série com uma célula piezoelétrica uma bobine no sentido de se obter a ressonância eléctrica do circuito (para além do circuito de rectificação com filtragem).

Este estudo pretende recriar a técnica SSHI apresentada anteriormente da literatura.



Figura 5.23 – Circuito de Compensação com Bobine

A partir dos dados do fabricante e com as frequências de trabalho (em torno dos 32 Hz), determinou-se analiticamente (ver anexos), que a bobine para a ressonância eléctrica de uma célula M-8528-P2 para este estudo seria de 144 H. Na impossibilidade de obter uma bobine com essas características testou-se esta técnica com um enrolamento de 24 mH de indutância.

5.5.2 Resultados

Com o dispositivo duplo colocou-se a Viga 1 a vibrar e mediu-se a tensão em cada célula e da série de duas células (dispositivo duplo) compensadas cada uma com uma bobine em série segundo a técnica SSHI. Foi soldado em laboratório o seguinte circuito:

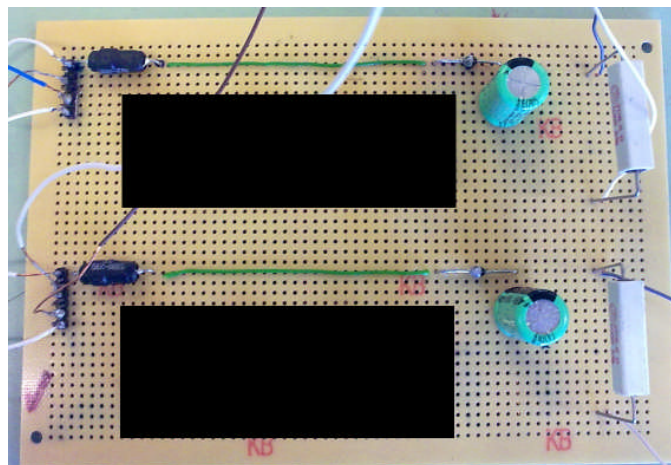


Figura 5.24 – Montagens de Compensação com Bobine em Série

Com o dispositivo SSHI colocou-se a Viga 1 a vibrar a uma frequência de ressonância conhecida (modo 3 ou 32 Hz) e fez-se variar a impedância de saída de um dispositivo em tipologia com uma célula com rectificação. Os resultados obtidos foram:

Tabela 5.9 – Bobine em Série com resistência de carga variável ($L = 24 \text{ mH}$)

Carga (Ω)	Tensão (V)	Potência (mW)	Condições dos ensaios
98,6	0,1	0,10	Viga: 1
196	0,3	0,46	Ponto de Encastramento: P1
3,9 k	4	4,10	Ponto de Excitação: P5
5,58 k	5	4,48	Frequência de excitação: 31,624 Hz
9,74 k	8,5	7,42	Amplitude de oscilação: $\Delta X = 6 \text{ mm}$
1,00 M	18	0,32	Carga: 100 Ω , 200 Ω , 4 k Ω , 6 k Ω , 10 k Ω , 1 M Ω e 5 M Ω
5,00 M	40	0,32	Ganho do Shaker: 3,0 dB

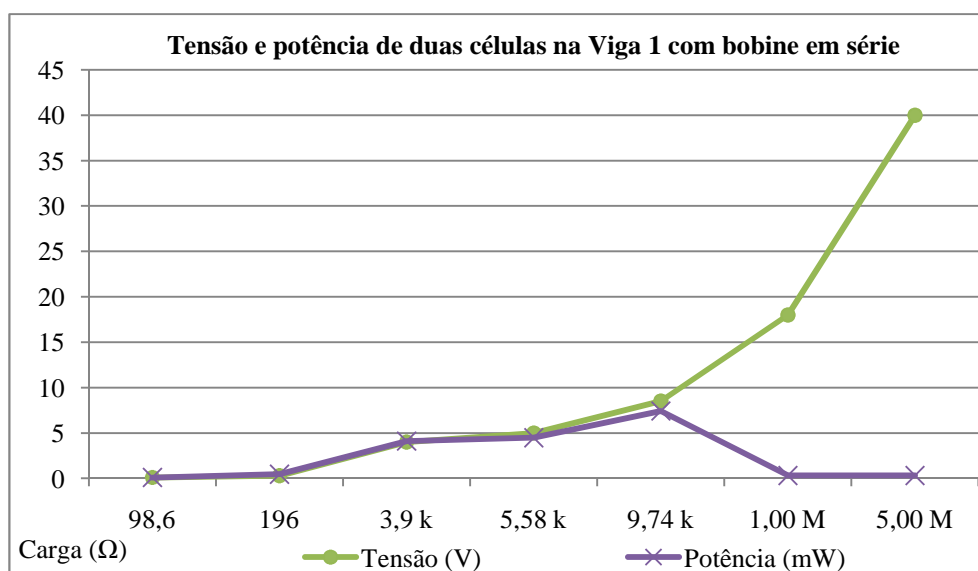


Figura 5.25 – Tensão e Potência da compensação com bobine

5.5.3 Conclusões

Comparando com o aproveitamento duplo em série ocorre um aumento considerável dos valores de tensão e a potência duplica de valor (com apenas 24 mH).

A potência é maximizada à medida que a impedância de saída tende a igualar o valor óptimo impedância de carga da estrutura dupla 166,23 k Ω (a 32 HZ).

A compensação do efeito capacitivo com uma bobine aproxima o dispositivo da ressonância eléctrica. Contudo, as frequências mecânicas limitam o dimensionamento electrónico desta solução.

5.6 Regulação da Tensão

5.6.1 Introdução

No sentido de implementar a técnica SECE anteriormente apresentada, a regulação da tensão DC foi implementada com um conversor DC-DC como mostra o esquema da Fig.5.26:

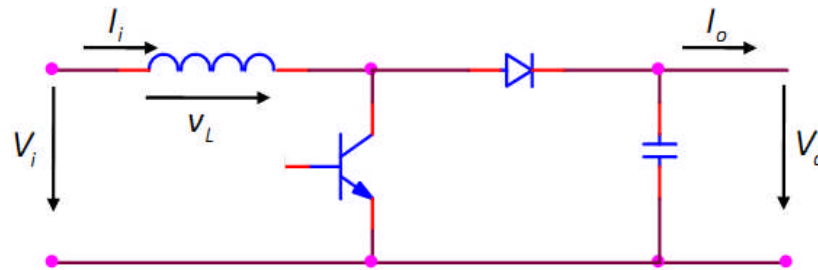


Figura 5.26 – Circuito do Conversor DC-DC Boost

O conversor boost permite aumentar a tensão contínua V_i de entrada e obter na saída uma tensão V_o superior. Esse aumento é conseguido à custa de uma diminuição da corrente de entrada na mesma proporção do ganho de tensão.

Actuando sobre a Gate do transístor (transístor é do tipo MOSFET na prática) sempre que este está activo, o díodo fica ao corte isolando a saída, permitindo o carregamento de energia para a bobine com indutância suficiente para a fonte de tensão (célula piezoelétrica). Quando o switch é desactivado, o andar de saída recebe a energia armazenada na bobine e a restante energia do andar de entrada, assumindo que o condensador de saída para filtragem é suficientemente grande para assegurar uma tensão de saída constante (invariante no tempo).

Transístor à condução durante: $t_{ON} : V_L = V_i$

Transístor ao corte durante: $t_{OFF} : V_L = V_i - V_o$

Em regime estacionário: $V_o = \frac{T}{t_{OFF}} = \frac{1}{1-D} V_i$ e $T = \frac{1}{f}$

Com D o duty-cycle que regula o aumento de tensão na saída e f a frequência eléctrica de comutação da Gate do transístor.

Foram soldados numa placa de prata dois circuitos conversores Boost para permitir a regulação da tensão das duas células piezoeléctricas (tipologia com duas células). Os dois circuitos montados estão na Fig.5.27:

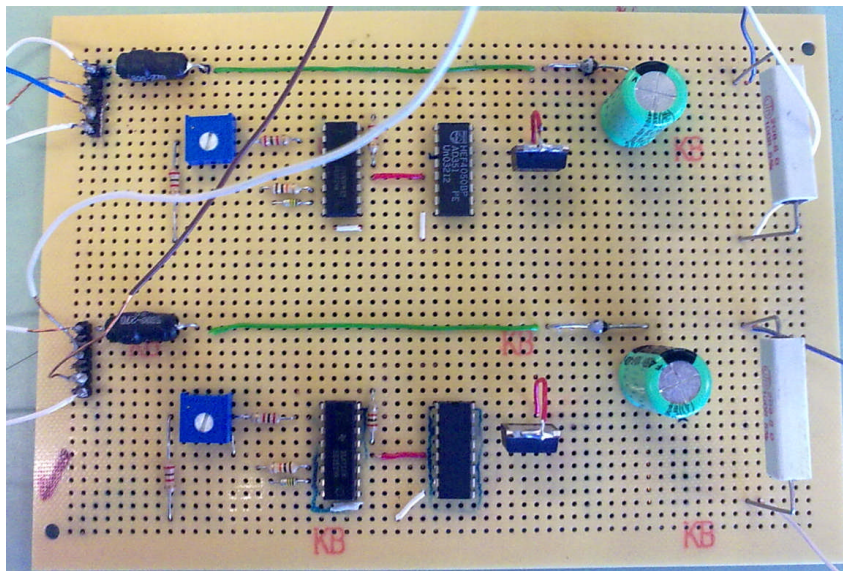


Figura 5.27 – Montagem experimental de Conversor Boost

Para a selecção dos integrados teve-se em conta as tensões de condução suportadas, as frequências de trabalho permitidas e o consumo de corrente.

Para filtragem da tensão DC foram usados condensadores Lenon, os díodos Philips e as bobines usadas são da Bourns, tal como foram anteriormente mencionados.

Inicialmente, os transístores MOSFET seleccionados foram os IRFS3107PbF da International Rectifier.

O controlo da Gate do transístor MOSFET é feito com o integrado SG3524 da Philips que controla o seu funcionamento (condução/corte) em função de um sinal binário gerado.

Para fazer o isolamento do circuito gerador de impulsos são usados circuitos seguidores (buffers) obtidos pelo integrado HEF4050BP da Texas Instruments e um Trimer (resistência regulável) da Bourns para regulação da largura (duração temporal) dos pulsos de comando e consequentemente o duty-cycle do conversor.

Consultando as especificações de cada componente empregue no circuito verificou-se que a corrente consumida pelo transístor MOSFET ($I_{DSS} = 250 \mu A$) era muito superior ao valor das correntes obtidas na entrada do conversor.

Para contornar esta questão o transístor foi substituído IRFB4332PBF da International Rectifier cuja corrente de condução inversa é menor que as correntes de entrada do conversor.

5.6.2 Resultados

Conseguiu-se colocar ambos os conversores a oscilar e regulados os respectivos Duty-Cycle de forma a conseguir obter-se o dobro da tensão na saída $D = 50\%$.

Tabela 5.10 – Sinais de controlo da Gate do transístor MOSFET do Conversor 1

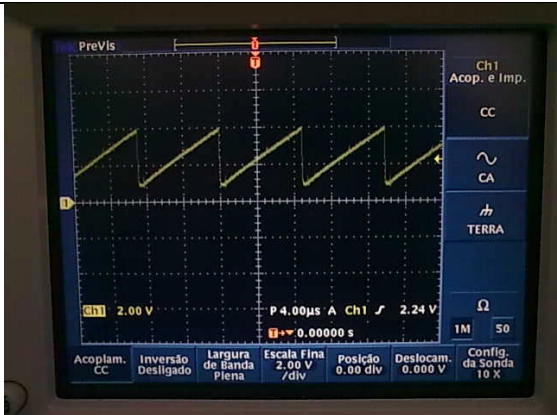
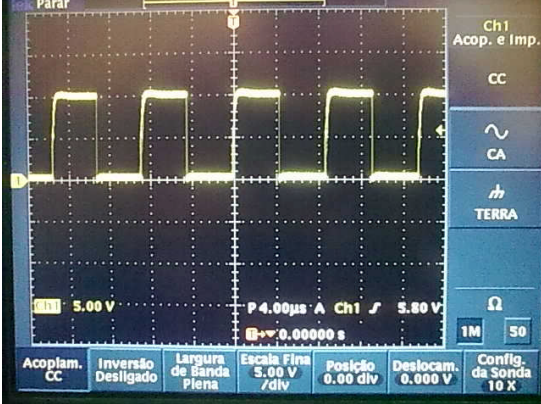
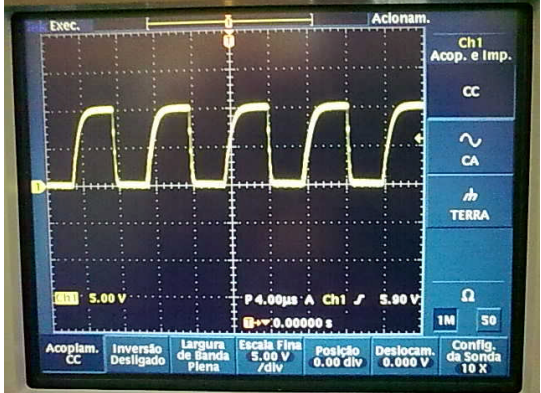

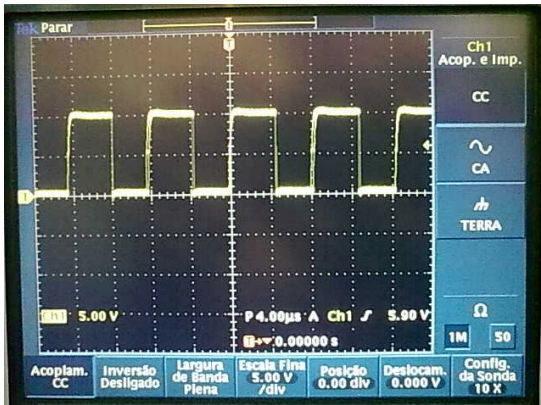
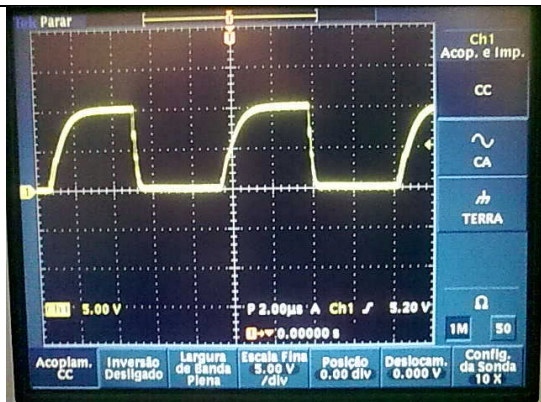
Sinal	Conversor 1
<p>Onda Triangular</p> <p>(regulação do Duty-cycle em 50% para obter o dobro da tensão na saída do conversor)</p>	
<p>Onda Quadrada</p> <p>(enviado do buffer para o gerador de impulsos)</p>	
<p>Sinal de Comando do MOSFET</p> <p>(ordens de condução/corte na Gate do transístor)</p>	

Tabela 5.11 – Sinais de controlo da Gate do transístor MOSFET do Conversor 2

Sinal	Conversor 2
<p>Onda Triangular</p> <p>(regulação do Duty-cycle em 50% para obter o dobro da tensão na saída do conversor)</p>	
<p>Onda Quadrada</p> <p>(enviado do buffer para o gerador de impulsos)</p>	
<p>Sinal de Comando do MOSFET</p> <p>(ordens de condução/corte na Gate do transístor)</p>	

Contudo observou-se que pela ordem de grandeza das correntes na entrada e os consumos nos circuitos integrados (na ordem de alguns μA) a tensão DC no andar de saída foi exactamente a mesma que foi colocada na entrada (20 V). Estes resultados podem indicar o incorrecto funcionamento de algumas componentes do circuito para as grandezas das medidas em causa.

5.6.3 Conclusões

Os níveis de corrente obtidos com as células MFC usadas são da ordem dos micro-ampere o que se revelou insuficiente uma vez que os integrados usados apresentam consumos de correntes superiores aos dessas correntes.

6. Discussão

Os resultados obtidos mostram que o dispositivo de colheita pode gerar potências numa gama de μW a alguns mW , não ultrapassando os $7,5 \text{ mW}$, indicada para electrónica de baixa potência. As conclusões principais a retirar desta dissertação são:

1. A tensão eléctrica de saída é proporcional à amplitude em oscilações uniformes.
2. As frequências de oscilação muito elevadas correspondem potências muito reduzidas, não sendo indicadas em colheita de energia.
3. As células MFC são mais sensíveis à amplitude da extensão do que à frequência.
4. O ajuste da posição das células no dispositivo permite captar os pontos de inflexão onde as deformações da estrutura suporte têm maior amplitude.
5. Existem valores óptimos de impedância de carga para os quais a potência é máxima, correspondendo aproximadamente ao triplo da impedância das células piezoeléctricas.
6. As células piezoeléctricas comportam-se como fontes de tensão uma vez que a associação em série permite multiplicar em função do número de células associadas.
7. O efeito capacitivo das células piezoeléctricas pode ser compensado por meio de bobine que permitem aumentos significativos das potências obtidas, uma vez que quanto mais perto da ressonância eléctrica maior é o fluxo de cargas eléctricas por unidade de tempo.

Este estudo permitiu caracterizar tanto do ponto de vista mecânico como eléctrico os desafios que podem surgir no desenvolvimento de dispositivos de colheita de energia de baixa potência.

Sendo o conceito de colheita de energia do maior interesse, existe ainda uma fraca correlação entre a tecnologia disponível no mercado e as diversas aplicações que esta pode ter.

O desenvolvimento de novas tecnologias de materiais piezoeléctricos, a maximização dos níveis de potência que se pode extrair quer seja com recurso à electrónica quer seja com a exploração de novos dispositivos mecânicos são estratégias pelas quais se devem fundamentar estudos futuros nesta área.

7. Bibliografia

Artigo

- [1] Casimiro, F., Gaspar, P. D. e Gonçalves, L. C. (2009). *Aplicação do princípio piezoelétrico no desenvolvimento de pavimentos para aproveitamento energético*. Universidade da Beira Interior, Portugal.
- [2] Daue, T. P., Kunzmann, J. e Schönecker, A. (1990). *Energy Harvesting Systems Using Piezo-Electric Macro Fiber Composites*. Smart Material Corp, Germany e USA.
- [3] Feenstra, J., Granstrom, J. e Sodano, H. (2007). *Energy harvesting through a backpack employing a mechanically amplified piezoelectric stack*. Arizona State University, USA.
- [4] Howells, C. A. (2009). *Piezoelectric energy harvesting*. Power Technology Branch, USA.
- [5] Lebrun, L., Guyomar, D. e outros (2008). *The Characterization of the harvesting capabilities of an electrostrictive polymer composite*. Villeurbanne, France.
- [6] Mateu, L. e Moll, F. (2006). *Appropriate charge control of the storage capacitor in a piezoelectric energy harvesting device for discontinuous load operation*. Universitat Politècnica de Catalunya, Spain.
- [7] Starner, T. e Paradiso, J. A. (2004). *Human Generated Power for Mobile Electronics*. College of Computing Georgia Tech e Media Laboratory MIT. Atlanta e Cambridge, USA
- [8] Tang, L., Yang, Y. e LI, H. (1990). *Optimizing Efficiency of Energy Harvesting by Macro-Fiber Composites*. Nanyang Technological University, Singapore.

Livro

- Inman, D. J. e Priya, S. (2009). *Energy Harvesting Technologies*. Virginia Tech Center for Intelligent Material Systems and Structures, USA.
- Meirovitch, L. (1967). *Analytical Methods in Vibrations*. Collier-MacMillan Limited, UK.
- Sedra, A. S. e Smith, K. C. (2004). *Microelectronic Circuits*. Oxford University, UK.
- Setter, N. (2002). *Piezoelectric Materials in Devices*. EPFL Swiss Federal Institute of Technology, EPFL, Switzerland.

Dissertação

- Lloyd, J. M. (2004). *Electrical Properties of Macro-Fiber Composite Actuators and Sensors*. Master of Science In Mechanical Engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
- Sodano, H. A. (2003). *Macro-Fiber Composites for Sensing, Actuation and Power Generation*. Master of Science In Mechanical Engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.

Referências electrónicas

smart-material.com – Smart Material Corporation (USA)

8. Glossário

AFC – Composto Activo de Fibras (*Active Fiber Composite – designação inglesa*)

GEP – Geradores Eléctricos Piezoeléctricos

MFC – Compósito de Macro Fibras (*Macro-Fiber Composite – designação inglesa*)

PFC – Compostos Piezocerâmicos de Fibras (*Piezoelectric Fiber Composites – designação inglesa*)

PVDF – Fluoreto de Polivinilideno (*Polyvinylidene Fluoride – designação inglesa*)

PZT – Titanato Zirconato de Chumbo (*Lead Zirconate Titanate – designação inglesa*)

SECE – Extracção Síncrona de Carga Eléctrica (*Synchronous Electric Charge Extraction – designação inglesa*)

SSHI – Colheita Síncrona Comutada na Bobine (*Synchronized Switch Harvesting on Inductor – designação inglesa*)

UAV – Veículo Aéreo Não Tripulado (*Unmanned Air Vehicle – designação inglesa*)

Anexos

Compensação com Bobine (dimensionamento)

Dimensionamento da Bobine para compensação do Efeito capacitivo das células piezoelétricas.

A ressonância eléctrica de um circuito que funciona a uma dada frequência é conseguida quando se compensa o efeito da impedância da fonte neste caso capacitiva com uma bobine em série. Equivalentemente tem-se:

$$j\omega L = \frac{1}{j\omega C} \Leftrightarrow j^2 \omega^2 = \frac{1}{LC} \Leftrightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Leftrightarrow f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Sendo a capacidade das células piezoelétricas do modelo M-8528-P2 de 172 nF e a frequência eléctrica de oscilação 32 obtém-se:

$$32 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times 172 \times 10^{-9}}} \Leftrightarrow L = 144H$$

Como a bobine que se arranjou tem 24 mH de indutância, esta seria ideal para compensar a célula usada a uma frequência de:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{24 \times 10^{-3} \times 172 \times 10^{-9}}} \Leftrightarrow f = 2477Hz$$

Regulação de Tensão (dimensionamento)

Como a bobine usada no conversor 27 μH de indutância, esta seria ideal para compensar a célula usada a uma frequência de:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{27 \times 10^{-6} \times 172 \times 10^{-9}}} \Leftrightarrow f = 74\text{kHz} \text{ que seria a frequência de ressonância eléctrica.}$$

Sabendo que a frequência de oscilação tem que ser maior que a de ressonância eléctrica do circuito ($f_{res.} < f_{sw}$) usou-se $f_{sw} = 100\text{kHz}$ no oscilador do integrado SG3524.

Segundo fabricante o oscilador obedece à seguinte relação: $\frac{1,18}{R_T C_T} = f_{sw}$ e $f_{sw} = 100\text{kHz}$

$$\text{Logo vem que } R_T C_T = \frac{1,18}{100 \times 10^3} = 1,18 \times 10^{-5}$$

A partir das curvas características fornecidas pelo fabricante do oscilador pode-se escolher:

$$\begin{cases} R_T = 10\text{k}\Omega \\ C_T = 1\text{nF} \end{cases}$$